



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

ASPEKTY NAVRHOVÁNÍ STAVEB ZAMĚŘENÉ NA ŽIVOTNOST

ASPECTS OF BUILDING DESIGN FOCUSED ON DURABILITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Iveta Bučilová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.

BRNO 2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Iveta Bučilová

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Řízení rizik stavebních konstrukcí (3901T044)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aspekty navrhování staveb zaměřené na životnost

v anglickém jazyce:

Aspects of building design focused on durability

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V roce 2012 byla přijata norma ISO 16204 "Trvanlivost - Návrh životnosti betonových konstrukcí". Podle závazků stanovených smlouvou WTO o technických bariérách obchodu se očekává, že uvedené principy budou implementovány do národních a regionálních standardů. Diplomová práce popisuje a rozebírá požadavky a přístupy nové normy ISO 16204 v kontextu se stávajícími požadavky uvedenými v ČSN EN 1990, ČSN EN 1992 a ČSN EN 206.

Cíle diplomové práce:

Provést rešerše dotčených technických a právních předpisů, srovnat jejich požadavky s ISO 16204 a na praktickém příkladu zhodnotit ukázat jejich možnou aplikaci.

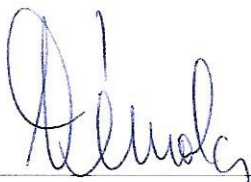
Seznam odborné literatury:

ISO 16204 Durability -- Service life design of concrete structures, ISO, 2012
ČSN EN Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. ÚNMZ, 2014
ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, ÚNMZ, 2004
ČSN ISO 31000 Management rizik - Principy a směrnice, ÚNMZ, 2011
ČSN EN 31010 Management rizik - Techniky posuzování rizik, ÚNMZ, 2011
Relevantní právní a jiné požadavky.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 23. 10. 2015



doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.
ředitel vysokoškolského ústavu



Abstrakt

Diplomová práce pojednává o životnosti stavebních konstrukcí z hlediska vybraných příčin poruch, které jsou uvedeny a rozebrány v normě ISO 16204 - „Trvanlivost - Návrh životnosti betonových konstrukcí“. Vybranými příčinami poruch bude karbonatace a mrazuvzdornost betonu. Na tyto příčiny budou provedeny výpočetní analýzy několika druhů betonů, na základě kterých bude možno porovnat a rozebrat požadavky uvedené v normách ČSN EN 1990, ČSN EN 1992 a ČSN EN 206.

Abstract

The master's thesis discusses the life of building structures in terms of selected causes of failures are listed and discussed in ISO 16204 - "Durability - Service life design of concrete structures". The selected causes of failures will be carbonation and frost resistance of concrete. These causes will be performed computational analyzes for few types of concrete, based on these analyzes will be possible to compare and analyze the requirements specified in standards ČSN EN 1990, ČSN EN 1992 and ČSN EN 206.

Klíčová slova

Životnost stavebních konstrukcí, karbonatace betonu, mrazuvzdornost betonu, trvanlivost stavebních konstrukcí, vady a poruchy konstrukcí.

Keywords

Service life of structures, concrete carbonation, concrete frost resistance, durability of structures, defects and disorders structures..

Bibliografická citace

BUČILOVÁ, I. *Aspekty navrhování staveb zaměřené na životnost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2016. 68 s + 12 s. přílohy. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne25. 5. 2016.....

.....Bucilová'.....

podpis diplomantky

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáši Vymazalovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícný přístup a za poskytnuté rady v průběhu zpracování diplomové práce.

Dále bych ráda poděkovala Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D. a doc. Ing. Michalu Stehlíkovi, Ph.D. za poskytnutí odborných rad.

Poděkování patří také mé rodině a přátelům za podporu, která se mi dostávala v průběhu celého studia a při tvorbě této práce.

OBSAH

Úvod	10
1 Životnost stavebních objektů	11
1.1 Návrh životnosti	12
1.2 Rizikové faktory ovlivňující životnost staveb	13
1.2.1 Vady a poruchy z hlediska mezního stavu únosnosti	14
1.2.2 Vady a poruchy z hlediska mezního stavu použitelnosti – přetvoření.....	16
1.2.3 Vady a poruchy z hlediska mezního stavu použitelnosti – trhlin	16
1.2.4 Vady a poruchy z hlediska odolnosti proti korozi	17
1.3 Návrhová životnost.....	18
1.4 Trvanlivost.....	18
1.5 Spolehlivost konstrukce.....	20
1.6 Řízení spolehlivosti	22
1.6.1 Rizikové třídy – třídy následků	22
1.6.2 Třídy spolehlivosti	22
1.7 Údržba a hodnocení stavu.....	23
1.8 Stupeň vlivu prostředí.....	24
2 Vybrané příčiny poruch betonových konstrukcí	26
2.1 Karbonatace betonu	26
2.1.1 Určení míry karbonatace betonu pomocí fyzického měření.....	26
2.1.2 Ověření životnosti konstrukce z hlediska karbonatace výpočtem dle ISO 16204.....	27
2.1.3 Etapy karbonatace.....	33
2.1.4 Karbonatace s vlivem trhlin	34
2.2 Mrazuvzdornost betonu	35
2.2.1. Určení mrazuvzdornosti betonu pomocí fyzického měření.....	35
2.2.2 Ověření životnosti konstrukce z hlediska mrazuvzdornosti výpočtem dle ISO 16204.....	37
3 Experimentální část	40
3.1 Receptury betonu	40
3.1.1 První receptura.....	41
3.1.2 Druhá receptura	41

3.1.3	<i>Třetí receptura</i>	41
3.1.4	<i>Čtvrtá receptura</i>	42
3.1.5	<i>Pátá receptura</i>	42
3.1.6	<i>Šestá receptura</i>	42
3.2	Určení míry karbonatace metodou dílčích součinitelů	43
3.3	Výsledky analýzy houbky karbonatace	46
3.3.1	<i>Výsledek první receptury</i>	46
3.3.2	<i>Výsledek druhé receptury</i>	47
3.3.3	<i>Výsledek třetí receptury</i>	48
3.3.4	<i>Výsledek čtvrté receptury</i>	49
3.3.5	<i>Výsledek páté receptury</i>	50
3.3.6	<i>Výsledek šesté receptury</i>	51
3.4	Diskuze výsledků analýzy karbonatace betonu	52
3.5	Určení mrazuvzdornosti metodou dílčích součinitelů	55
3.6	Výsledky výpočtu mrazuvzdornosti betonu	57
3.6.1	<i>Výsledek první receptury</i>	57
3.6.2	<i>Výsledek druhé receptury</i>	57
3.6.3	<i>Výsledek třetí receptury</i>	58
3.6.4	<i>Výsledek čtvrté receptury</i>	58
3.7	Diskuze výsledků analýzy mrazuvzdornosti betonu	59
4	Závěr	62
	Seznam použitých zdrojů.....	64
	Seznam obrázků.....	67
	Seznam tabulek.....	68
	Seznam příloh	68

ÚVOD

Životnost stavebních konstrukcí je odvozena z několika faktorů, některé se dají předvídat, ale jiné mohou být nežádoucí a v počátku nepředvídatelné. Při návrhu každé stavební konstrukce je nutné dbát na to, aby životnost byla co nejdelší, společně s její trvanlivostí a spolehlivostí nejen z hlediska účelu funkce, ale také z ekonomického hlediska. Životnost konstrukce je ovlivněna nejen při jejím návrhu, ale také při výstavbě každé její části a na způsobu následného užívání. Některým faktorům ovlivňující životnost lze předcházet a odstranit je nebo alespoň eliminovat jejich příčiny a následky, některým bohužel předcházet nelze, ale i přesto je důležité je předpokládat a konstrukci navrhnout tak, aby i při výskytu nepravděpodobných nehod nebyly následky dramatické na bezpečnost užívání, hospodárnost stavby a její funkci [5].

Příčin poruch ovlivňující životnost i kvalitu konstrukcí je mnoho. Tato diplomová práce bude zaměřena na vybrané příčiny, kterým se věnuje norma ISO 16204 [3], konkrétně karbonataci betonu a mrazuvzdornosti betonu bez pomoci chemických prostředků. Pomocí analýz bude docíleno výsledků životnosti konstrukce z různých druhů betonů vystaveným danému okolnímu prostředí. Bude provedena analýza předpokládaného průběhu karbonatace betonu, kdy bude sledován nárůst karbonatační hloubky v průběhu životnosti konstrukce. A v druhé analýze průběhu mrazuvzdornosti betonu bude sledován nárůst stupně nasycení. Tyto teoretické analýzy budou porovnány s výsledky laboratorních měření.

1 ŽIVOTNOST STAVEBNÍCH OBJEKTŮ

Každý výrobek má svojí životnost, stejně tak je i u stavebních objektů. Životnost stavebních objektů je dána časovým obdobím, ve kterém daný objekt musí vykonávat funkce, pro které byl navržen, a dovolit vlastníkovvi jej bez problémů užívat. Každý objekt má svojí vlastní životnost, která je dána různými parametry a okolnostmi.

U stavebních objektů lze rozeznávat tyto druhy životnosti:

- technická životnost – časové období, které uvažujeme od vzniku stavby po její zchátrání nebo technický zánik s předpokladem běžné údržby, ale bez větších oprav. Technická životnost ve většině případů převyšuje ekonomickou životnost;
- ekonomická životnost – časové období, které uvažujeme od vzniku stavby do okamžiku ztráty ekonomické užitečnosti a smysluplnosti, tzn. okamžik trvalé ztráty výnosů nebo ztráta využitelnosti změnou vnějších podmínek bez možnosti jiného využití;
- morální životnost – časové období, které uvažujeme od vzniku stavby do okamžiku zastarání stavby – styl, změny trhu, dispoziční řešení, standardy a technologie, rozvoj území;
- právní životnost – časové období od kolaudačního souhlasu do okamžiku povolení o odstranění stavby [1].

Aby se mohla stanovit životnost betonové konstrukce nebo její části, je nutné stanovit i definici pro konec životnosti. Konec životnosti může být definován například jako stav, kdy:

- vzhledem k překročení projektované únosnosti nebo degradaci materiálu je bezpečnost konstrukce nepřijatelná;
- degradace materiálu je výrazná, například koroze výztuže vyvolaná situací, kdy pronikající chloridové ionty dosáhly mezní hodnoty (kritické koncentrace iniciující korozi) v hloubce uložení výztuže;
- parametry potřebné pro provoz konstrukce jsou nedostačující;
- požadavky na údržbu přesahují přípustnou hranici;
- konstrukce vykazuje nepřijatelný estetický vzhled.

Rozhodnutí o konci životnosti konstrukce musí být řádně zvážena s ohledem na ekonomické stránky a bezpečnost osob. V daných případech je možné akceptovat

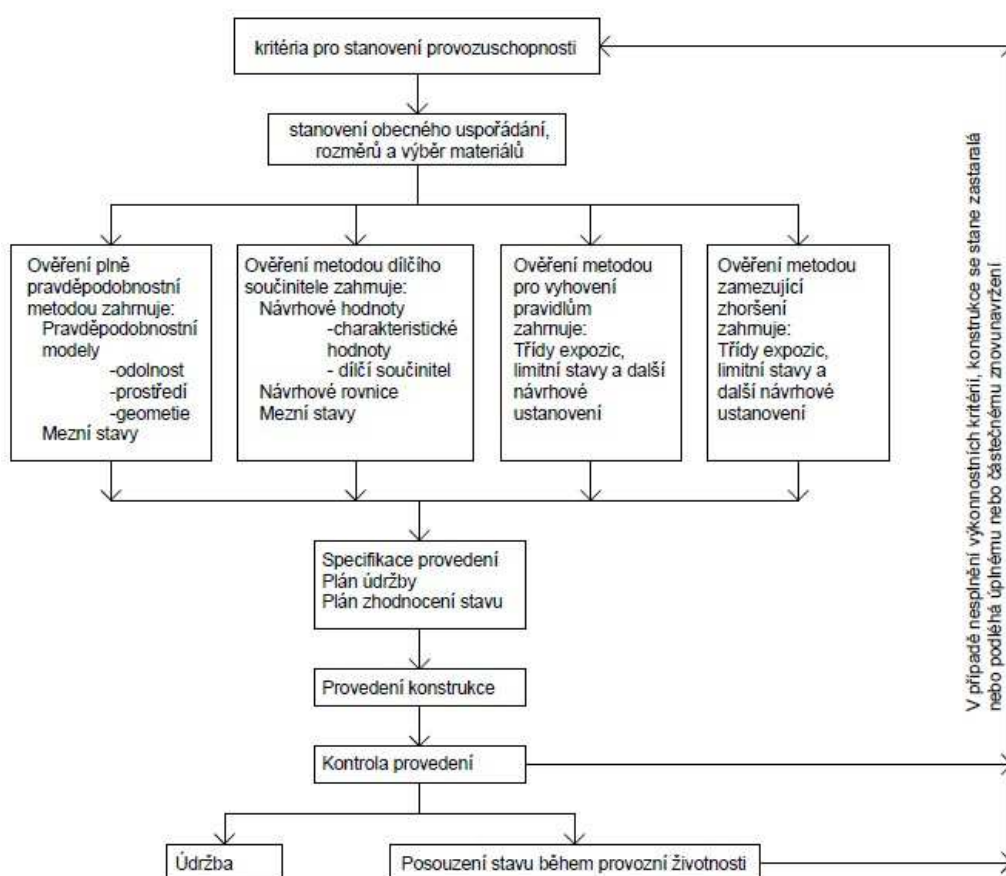
konstrukce, které mají stav pod stanovenou mez, je však třeba uvážit další náklady nebo ztráty spojené s obnovením dovoleného a bezpečného stavu [2].

1.1 NÁVRH ŽIVOTNOSTI

Návrh životnosti je předpokládaná doba, po kterou se konstrukce nebo její část používá k danému účelu s očekávanou údržbou, ale bez větších potřebných oprav.

Vývojový diagram na následujícím obrázku znázorňuje tok rozhodnutí a projekčních činností potřebných v procesu návrhu životnosti se zvolením úrovně spolehlivosti. Byly přijaty dvě strategie - v první jsou rozlišovány tři úrovně náročnosti a ve druhé jedna. Celkem jsou k dispozici čtyři možnosti:

- Plně pravděpodobnostní metoda
- Metoda dílčího součinitele
- Metoda vyhovující
- Metoda zamezující zhoršení [3]



Obr. 1 Vývojový diagram pro životnost konstrukce [3]

1.2 RIZIKOVÉ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ŽIVOTNOST STAVEB

Rizikové faktory jsou jevy snižující životnost konstrukce pod určitou úroveň odolnosti proti působení zatížení a různým vlivům prostředí. Obecně se tyto jevy označují jako vady a poruchy konstrukce.

Vada konstrukce – jev na konstrukci nebo její vlastnost, která snižuje spolehlivost pod potřebnou míru, a to z hlediska veškerých účinků zatížení a vlivů prostředí. Vady konstrukce vyplývají z účelu pro danou konstrukci při předpokládaném způsobu užívání [4].

Lze je rozdělit na:

- vady bezpečnostní – poruchy závažné ze statického i stavebního hlediska;
- vady prostředí z hlediska ekologického a hygienického;
- vady vnější – estetické;
- vady vzniklé nedodržením nebo neznalostí použitých materiálů a technologií provádění [5].

Porucha konstrukce – projevuje se menší než potřebnou odolností nebo-li odporem konstrukce, a to z hlediska zatížení a prostředí působící na danou konstrukci. U poruch z hlediska mezních stavů únosnosti a použitelnosti jde o dosažení právě těchto mezních stavů [4].

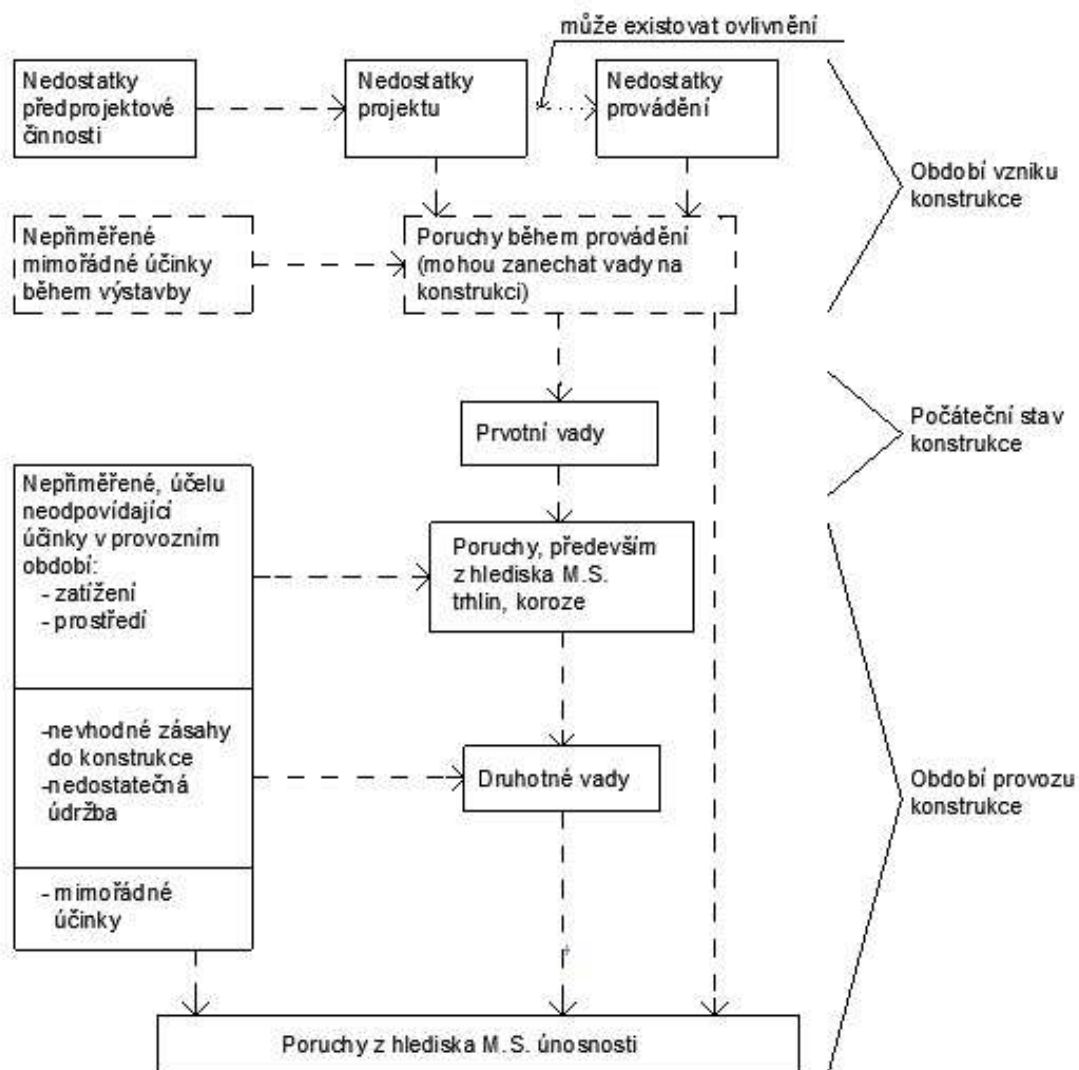
Bývá obtížné vyhledat příčiny závad a určit, která z nich nebo jejich kombinace je rozhodující zejména u závad bezpečnosti. Často platí, že čím větší je závada, tím více příčin se na závadě podílelo, ovšem není to pravidlem. Z hlediska obtížnosti zjištění nepříznivých vlivů je možné závady rozdělit na kategorie:

- nepříznivé stavy I. kategorie – stavy lze zjistit prohlídkou konstrukce (trhlíny, odchylky – vybočení, deformace, apod.)
- nepříznivé stavy II. kategorie – je nutné provedení mechanických zkoušek vlastností materiálů, ověření uložení výztuže, jejího množství apod.
- nepříznivé stavy III. kategorie – zjišťují se velice obtížně, prošetřuje se projektová dokumentace, statické výpočty, chemické analýzy apod. [5].

Kategorií a dělení vad a poruch betonových konstrukcí nebo jejich částí existuje mnoho, například se dělí podle doby vzniku, závažnosti, jejich příčin, podle polohy vzniku apod. Dále se vady a poruchy dělí podle toho, v jakém mezním stavu vada ohrožuje míru spolehlivosti konstrukce a jakého mezního stavu bylo dosaženo vzniklou poruchou.

Základní kategorie vad a poruch jsou následující:

- z hlediska mezního stavu únosnosti;
- z hlediska mezních stavů použitelnosti (trhliny, přetvoření);
- z hlediska odolnosti proti korozi [4].



Obr. 2 Možné příčinné vztahy vzniku vad a poruch [4]

1.2.1 Vady a poruchy z hlediska mezního stavu únosnosti

V případě, že nastanou tyto vady a poruchy, je zřejmé, že staticky minimální přípustná únosnost konstrukce je menší než staticky předpokládaný maximální účinek zatížení na konstrukci. Vada vzniká v okamžiku, kdy hodnota odolnosti konstrukce (odporu) je menší

než hodnota účinků zatížení, které bylo navrženo pro odpovídající účel konstrukce při předpokládaném provozu.

Nedostatky v předprojektovém období:

- částečně nebo zcela nepřesné stanovení účelu stavby;
- nevhodně zvolené umístění stavby;
- časová i ekonomická náročnost;
- nedostatečné průzkumy podloží, staveniště.

Nedostatky v projektové činnosti:

- převzetí neúplného podkladu;
- nevýstižné statické pojetí konstrukce (tuhosti styků, spolupůsobení prvků);
- chybné stanovení účinků zatížení, omyly ve statických výpočtech, v dimenzování a ve výkresové dokumentaci;
- nevhodně zvolený typ materiálu;
- chyby v konstrukčním řešení (kotvení a uložení výztuže, typ průřezu, atd.);
- neznalost norem a předpisů;
- neuvedení předpisů pro provedení konstrukce a její následnou údržbu a ošetřování.

Příčiny vad z období výroby a výstavby konstrukce:

- zvolení nekvalitního materiálu;
- nedodržení zvolených technologických postupů při výrobě konstrukce, prvků, čerstvého betonu;
- chybné uložení a množství výztuže;
- špatné ošetření betonu v jakémkoliv stádiu tvrdnutí a tuhnutí;
- proti nepříznivým vlivům počasí je konstrukce nedostatečně chráněná.

Příčiny vad vznikající v provozním období:

- nesprávné zásahy do konstrukce (vybourání části může způsobit oslabení konstrukce, neodborné zásahy atd.);
- vliv prostředí a provozu (únava materiálu, stárnutí, oslabení výztuže a betonu vlivem koroze atd.) [4].

1.2.2 Vady a poruchy z hlediska mezního stavu použitelnosti – přetvoření

Vadou mezního stavu použitelnosti je nižší spolehlivost konstrukce, než je potřebná pro zabránění vzniku přetvoření. Přetvoření vzniká z několika hledisek, jako je vzhledové hledisko, které způsobuje nedůvěru uživatelů vůči bezpečnosti konstrukce. Dále vzniká z hlediska provozního, který brání využívat prostory pro dané účely (prohnutý strop apod.). Konstrukční hledisko se projevuje například zkosením otvorů, trhlinami v příčkách, vybočením příček apod. Posledním z hledisek je fyziologické, které vzbuzuje v uživateli konstrukce nepříjemné pocity (pohyb málo tuhého stropu).

Nedostatky v předprojektovém a projektovém období:

- nedostatečné, chybné údaje o účelu objektu a o zatížení;
- nevhodně zvolený konstrukční systém (slabé desky, velké rozpětí);
- z hlediska přetvoření chybně stanovený výsledek posouzení konstrukce;
- zanedbání dalších vlivů (dotvarování a smršťování betonu, vlhkost vzduchu, teplotní změny, vliv předpětí);
- chybné statické výpočty a provedení projektové dokumentace.

Nedostatky ve výrobě konstrukce:

- neznalost předepsaných pokynů (velikost průřezu, jeho tvar, uložení prvku);
- výrobní postupy nejsou dodrženy nebo jsou nevhodně zvoleny;
- špatné složení čerstvého betonu;
- během výstavby dochází k předčasnému zatěžování.

Nedostatky v provozu:

- oslabení tuhosti konstrukce například únavou materiálu, trhlinami, korozí;
- nevhodné zásahy do konstrukce [4].

1.2.3 Vady a poruchy z hlediska mezního stavu použitelnosti – trhlin

Vadou mezního stavu použitelnosti je nižší spolehlivost konstrukce, než je potřebná pro zabránění vzniku trhlin. V případě, že trhliny vzniknou, musí být zabráněno jejich rozevírání do maximální přípustné šířky.

Nedostatky v předprojektovém a projektovém období:

- nedostatečné podklady o prostředí výstavby a o provozu;

- neznalost projektů a jejich podkladů;
- nevhodně zvolený konstrukční systém;
- zanedbání předpisů pro navrhování proti vzniku trhlin;
- zanedbání vlivu teplotních změn a smršťování betonu;
- špatně zvolená a navržená výztuž bránící vzniku trhlin;
- nedostatečné nebo žádné navržené ošetřování betonu, výroby a pracovního postupu;
- chybné statické výpočty a provedení projektové dokumentace.

Nedostatky ve výrobě a v období výstavby:

- nedodržení výrobního postupu;
- zanedbané ošetření betonu jak v období mladého betonu, tak v období tvrdnutí;
- špatné umístění výztuže – snižuje odolnost;
- dilatační spáry neplní svoji funkci;
- špatné uložení prefabrikovaných nosníků [4].

1.2.4 Vady a poruchy z hlediska odolnosti proti korozi

Vady a poruchy z hlediska odolnosti proti korozi tvoří nejvýznamnější faktor zabezpečující potřebnou životnost konstrukce. Pro běžné konstrukce (průmyslové a bytové domy bez chemicky agresivního prostředí apod.) by pro zajištění dostatečné odolnosti mělo postačit splnění krycích vrstev dle norem a dalších spolehlivostních podmínek zamezujících vznik trhlin. V případě specifického složení betonu v silně agresivním prostředí ve většině případů nejsou stanoveny žádné podmínky, a proto v případě určování životnosti způsobují nejasnosti a nejistoty.

Nedostatky v předprojektovém a projektovém období:

- chybný nebo nedostatečný návrh pro zabezpečení konstrukce proti korozi (složení a třída betonu, tloušťka krycí vrstvy, druhotná ochrana – ochranné vrstvy, nátěry);
- špatné provedení styků v případě použití prefabrikovaných prvků v agresivním prostředí;
- nesprávné tvary průřezů, konstrukce.

Nedostatky v provádění:

- nedodržení zásad navržených v projektu (tloušťka krycí vrstvy, ochranné vrstvy a nátěry, složení betonu apod.);

- nesprávné provedení ochranných nátěrů a vrstev (tloušťka nátěru, druh, příprava podkladu apod.);
- při provedení krycí vrstvy nedostatečné provedení zhutnění betonu;
- chybné provedení spádů svodů a podlah.

Nedostatky v provozu:

- nevhodné zásahy do konstrukce – špatné zabezpečení proti vzniku koroze (oslabení průřezu apod.);
- úplné poničení nebo částečné poškození ochranných nátěrů a vrstev, krycí vrstvy betonu;
- poničení svodů a podlah;
- zanedbaná údržba konstrukce – pozdní opravy poničených částí [4].

1.3 NÁVRHOVÁ ŽIVOTNOST

Návrhová životnost je předpokládaná doba, po kterou se konstrukce nebo její část používá k danému účelu s očekávanou údržbou, ale bez větších potřebných oprav [3].

Tab. 1 Informativní návrhové životnosti [6]

Kategorie návrhové životnosti	Informativní návrhová životnost (v letech)	Příklady
1	10	dočasné konstrukce ⁽¹⁾
2	10 až 25	vyměnitelné konstrukční části, např. jeřábové nosníky, ložiska
3	15 až 30	zemědělské a obdobné stavby
4	80	budovy a další běžné stavby
5	100	monumentální stavby, mosty a jiné inženýrské konstrukce
⁽¹⁾ Konstrukce nebo jejich části, které mohou být demontovány s předpokladem dalšího použití, se nemají považovat za dočasné		

1.4 TRVANLIVOST

Trvanlivost betonových konstrukcí je výslednicí působení několika činitelů, které je možné rozdělit na vnější a vnitřní činitele. Vnější činitele svým účinkem a jeho velikostí

působící na beton rozhodují o povaze a intenzitě nežádoucího působení prostředí. Vnitřní činitelé jsou charakteristické vlastnosti betonu a betonové konstrukce, úzce souvisejí především s technologií betonu [7].

Trvanlivost znamená, že konstrukce musí být navržena tak, aby degradační procesy během její návrhové životnosti, za předpokladu náležité údržby a s ohledem na okolní prostředí, nenarušily její provozuschopnost více, než je přípustné [8].

Tyto požadavky mohou být splněny v jednom, nebo v kombinaci následujících způsobů:

- vytvořením ochranných a zmírňujících systémů;
- použitím materiálů, které, pokud budou správně udržované, nebudou degenerovat v průběhu životnosti konstrukce;
- poskytnutím takových rozměrů, že zhoršení během projektované životnosti je kompenzováno;
- volbou kratší životnosti konstrukčních prvků, které v případě potřeby jsou nahrazeny jednou nebo vícekrát během navržené životnosti;
- kontrolou konstrukce v pravidelných časových úsecích;
- volbou vhodné údržby.

Ve všech případech by měly být splněny požadavky na spolehlivost pro dlouhodobé a krátkodobé období [3].

Zkoušení a kontrola trvanlivosti betonu a jeho složek je prováděna zjednodušenými zrychlenými nebo krátkodobými zkouškami. Slouží především jako prostředky pro získání údajů degradačních procesů (způsobů a její rychlosti) a pro porovnání trvanlivosti betonu v jednotlivých prostředích. Dále se používá subjektivního měřítka pozorování změn pouhým okem, drobnohledem nebo mikroskopem.

Stupeň porušení betonu se posuzuje:

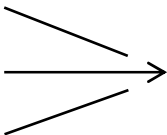
- pozorováním změn povrchu betonu – jeho struktury;
- poklesem hmotnosti;
- nasákavostí, propustností;
- součinitelem tepelné roztažnosti;
- objemovými změnami;

- změnami mechanických vlastností statických (pevností v tahu, tlaku, smyku, ohybu, modulu pružnosti);
- změnami dynamického modulu pružnosti [7].

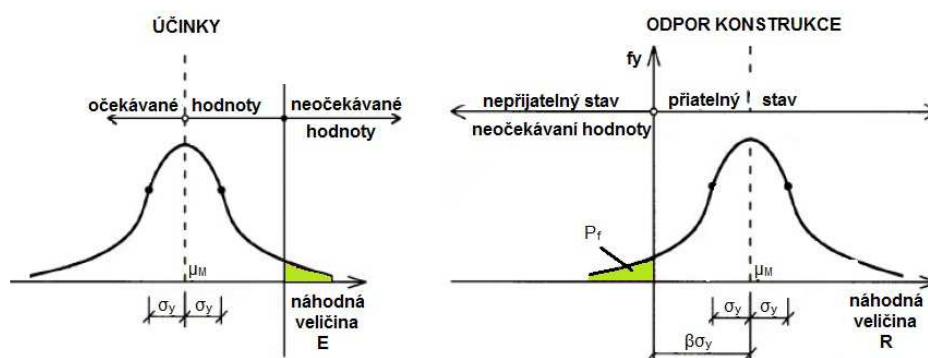
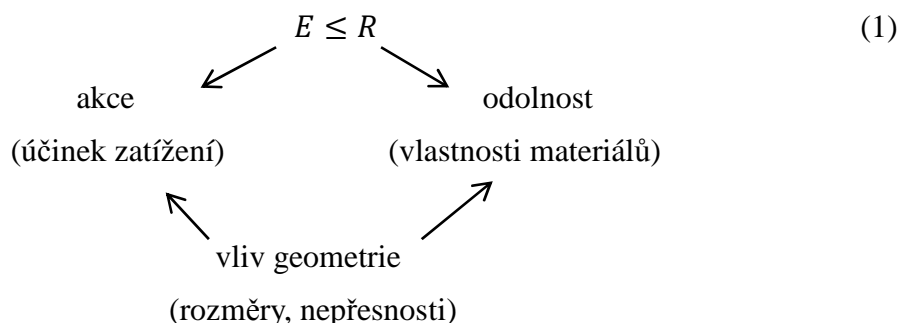
1.5 SPOLEHLIVOST KONSTRUKCE

Schopnost konstrukce plnit stanovené požadavky za daných podmínek, které jsou požadované bez změny provozních ukazatelů v určitých mezích a v požadovaném časovém období.

Spolehlivost lze rozdělit na dílčí složky:

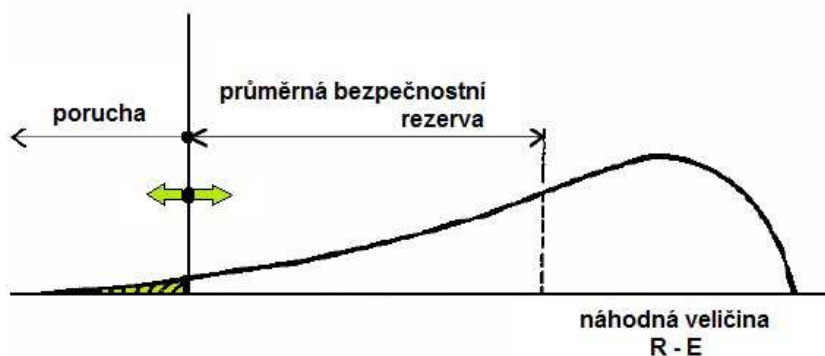
- únosnost
 - použitelnost
 - trvanlivost
- 

Podmínka spolehlivosti je dána nevyššími možnými účinky E , které působí na danou konstrukci, přičemž tyto účinky nesmí překročit nejnížší možný odpor konstrukce R . Pojem odpor konstrukce vyjadřuje spoustu parametrů, např. únosnost konstrukce, její stabilitu, mezní přetvoření apod.



Obr. 3 Vyjádření variability účinků a odporu konstrukce [9]

Mezi předpokládaným odporem a předpokládanými účinky vzniká rozdíl, bezpečnostní rezerva, jejíž velikost určuje spolehlivost návrhu, nebo-li pravděpodobnost poruchy.



Obr. 4 Bezpečnostní rezerva[9]

K porušení podmínky spolehlivosti dojde v případě, kdy konstrukce přestává plnit návrhové požadavky na užité vlastnosti či dojde k překročení mezního stavu (rozlišují se mezní stavy únosnosti a použitelnosti) [9].

Stupeň spolehlivosti by měl být určen s přihlédnutím k:

- příčině a způsobu porušení, což znamená, že struktura nebo konstrukční prvek, který se s velkou pravděpodobností náhle zhroutl bez varování, by měl být navržen pro vyšší stupeň spolehlivosti než pro ten prvek, kterému před kolapsem předchází varování a včasná opatření mohou omezit následky;
- možným důsledkům selhání, pokud jde o ohrožení života, zranění, potenciálních ekonomických ztrát;
- rozložení úrovně namáhání a postupům nezbytným pro snížení rizik selhání;
- sociálním a environmentálním podmínkám v určitém místě [10].

Odlišnosti stupňů spolehlivosti mohou být získány buď klasifikací celých konstrukcí nebo klasifikací konstrukčních prvků. Stupně spolehlivosti mohou být vybrány v souladu s následky selhání takto:

- nízké riziko pro ohrožení života – hospodářské a sociální důsledky na životní prostředí jsou malé nebo zanedbatelné;

- střední riziko pro ohrožení života – hospodářské, sociální a environmentální důsledky jsou značné;
- vysoké riziko pro ohrožení života - ekonomické, sociální a environmentální důsledky jsou velmi velké [10].

1.6 ŘÍZENÍ SPOLEHLIVOSTI

1.6.1 Rizikové třídy – třídy následků

Třída následků diferencuje požadovanou spolehlivost konstrukce tím, že se uvaží následky poruchy nebo funkční nezpůsobilost konstrukce. Výběr třídy následků je vyjádřený v předpokládaných ztrátách lidských životů, ekonomických ztrátách nebo v poškození životního prostředí způsobených poruchou nebo zřícením konstrukce nebo nosného prvku v závislosti na indexu spolehlivosti β [11].

Tab. 2 Definice tříd následků [8]

Třídy následků	Popis	Příklady pozemních nebo inženýrských staveb
CC3	velké následky s ohledem na ztráty lidských životů nebo velmi významné následky ekonomické, sociální nebo pro prostředí	stadióny, budovy určené pro veřejnost, kde jsou následky poruchy vysoké (např. koncertní sály)
CC2	střední následky s ohledem na ztráty lidských životů nebo značné následky ekonomické, sociální nebo pro prostředí	obytné a administrativní budovy a budovy určené pro veřejnost, kde jsou následky poruchy středně závažné (např. kancelářské budovy)
CC1	malé následky s ohledem na ztráty lidských životů nebo malé/zanedbatelné následky ekonomické, sociální nebo pro prostředí	zemědělské budovy, kam lidé běžně nevstupují (např. budovy pro skladovací účely, skleníky)

1.6.2 Třídy spolehlivosti

Při volbě úrovně spolehlivosti příslušné konstrukce je nutno uvážit okolnosti zahrnující:

- možnou příčinu a/nebo způsob dosažení mezního stavu;

- možné následky poruchy vyjádřené rizikem ztráty života, zraněním a možnými ekonomickými ztrátami;
- společenskou závažností poruchy;
- náklady a postupy nutné ke snížení rizika poruchy [9].

Hodnoty indexu spolehlivosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 3 Doporučení minimální hodnoty indexu spolehlivosti β (mezní stav únosnosti) [9]

Třída spolehlivosti	Minimální hodnoty β	
	referenční doba 1 rok	referenční doba 50 let
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

1.7 ÚDRŽBA A HODNOCENÍ STAVU

Pro údržbu konstrukce a kontroly při užívání stavby nebo její části je také rozhodující příslušná úroveň spolehlivosti. Jedna z úrovní hodnocení stavu (CAL) v průběhu životnosti je uvedena v následující tabulce [3].

Tab. 4 Úroveň hodnocení stavu [3]

Úroveň	Charakteristika	Požadavky
CAL3	rozšířená inspekce	Systematická kontrola a sledování příslušných parametrů pro zhoršení
CAL2	normální inspekce	Pravidelná vizuální kontrola kvalifikovaným personálem
CAL1	normální inspekce	Bez systematického sledování, ani kontrola
CAL0	bez inspekce	Bez možné inspekce, například v důsledku nedostatečného přístupu

V každodenní konstrukci je CAL1 často nejvhodnější úroveň, a její důsledky je třeba vzít v úvahu pro zprávu spolehlivosti.

Pokud je rozšířená inspekce CAL3 použita na konstrukci v jejím průběhu životnosti, majitel dostane možnost uplatnit proaktivní opatření v případě, že očekávaná životnost pro konstrukce není splněna. Důsledky případného nepřijatelného výkonu se tak sníží.

Není-li žádná kontrola po celou dobu životnosti, tedy CAL0, majitel nedostane žádné varování před dosažením mezního stavu konstrukce. U takových struktur by měla být použita větší spolehlivost (přísnější třída spolehlivosti) v průběhu návrhu životnosti konstrukce [3].

1.8 STUPEŇ VLIVU PROSTŘEDÍ

Klasifikační třídy betonu se určují podle podmínek prostředí, ve kterých je beton umístěn. Prostředím jsou myšleny fyzikální, mechanické nebo chemické vlivy, kterým je beton vystaven a které působí na beton nebo na výztuž uloženou v betonu. Nerespektují se jako zatížení při navrhování.

Konstrukce zhotovená z betonu může být vystavena více než jednomu vlivu prostředí. Nebo pro každou konstrukční část, mohou být dané povrchy betonu vystaveny různým vlivům prostředí uvedeným v Tab. 5 [12].

Tab. 5 Stupně vlivu prostředí [12]

Označení stupně	Popis prostředí	Informativní příklady výskytu stupně vlivu prostředí
1 Bez nebezpečí koroze nebo narušení		
X0	Pro beton bez výztuže nebo zabudovaných kovových vložek. Všechny vlivy s výjimkou zmrazování a rozmrazování, obrusu nebo chemicky agresivního prostředí. Pro beton s výztuží nebo se zabudovanými kovovými vložkami: Velmi suché	Beton uvnitř budov s velmi nízkou vlhkostí vzduchu.
2 Koroze vlivem karbonatace		
Pokud je beton obsahující výztuž nebo jiné zabudované kovové vložky vystaven ovzduší a vlhkosti, pak se stupeň vlivu prostředí určí následovně:		
XC1	Suché nebo stále mokré.	Beton uvnitř budov s velmi nízkou vlhkostí vzduchu; beton trvale ponořený ve vodě.
XC2	Mokré, občas suché.	Povrch betonu vystavený dlouhodobému působení vody; většina základů.
XC3	Středně mokré, vlhké.	Beton uvnitř budov se střední nebo velkou vlhkostí vzduchu; venkovní beton chráněný proti dešti.
XC4	Střídavě mokré a suché.	Povrchy betonu ve styku s vodou, které nejsou zahrnuty ve stupni vlivu prostředí XC2.

3 Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody		
Pokud přichází beton, obsahující výztuž nebo jiné zabudované kovové vložky, do styku s vodou obsahující chloridy, včetně rozmrazovacích solí, ze zdrojů jiných než z mořské vody, určí se vliv prostředí následovně:		
XD1	Středně mokré, vlhké.	Povrchy betonů vystavené chloridům rozptýleným ve vzduchu.
XD2	Mokré, občas suché.	Plavecké bazény. Beton vystavený působení průmyslových vod obsahujících chloridy.
XD3	Střídavě mokré a suché.	Části mostů vystavené postřikům obsahujícím chloridy. Vozovky, betonové povrchy parkovišť.
4 Koroze vlivem chloridů z mořské vody		
Pokud přichází beton, obsahující výztuž nebo jiné zabudované kovové vložky, do styku s chloridy z mořské vody nebo slaným vzduchem z mořské vody, musí být vliv prostředí určen následovně:		
XS1	Vystaven slanému vzduchu, ale ne v přímém styku s mořskou vodou.	Stavby blízko mořského pobřeží nebo na pobřeží.
XS2	Trvale ponořen ve vodě.	Části staveb v moři.
XS3	Smáčený a ostříkovaný přílivem.	Části staveb v moři.
5 Působení mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich		
Pokud je mokrá beton vystaven významnému působení střídavého mrazu a rozmrazování, určí se vliv prostředí následovně:		
XF1	Mírně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků.	Svislé betonové povrchy vystavené dešti a mrazu.
XF2	Mírně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky.	Svislé betonové povrchy silničních konstrukcí vystavené mrazu a rozmrazovacím prostředkům rozptýleným ve vzduchu.
XF3	Značně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků.	Vodorovné betonové povrchy vystavené dešti a mrazu.
XF4	Značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou.	Vozovky a mostovky vystavené rozmrazovacím prostředkům. Betonové povrchy vystavené přímému ostříku rozmrazovacími prostředky a mrazu. Omývaná část staveb v moři vystavená mrazu.
6 Chemické působení		
Pokud je beton vystaven chemickému působení rostlé zeminy a podzemní vody, určí se vliv prostředí následovně:		
XA1	Slabě agresivní chemické prostředí.	Beton vystavený rostlé zemině a podzemní vodě.
XA2	Středně agresivní chemické prostředí.	Beton vystavený rostlé zemině a podzemní vodě.
XA3	Vysoce agresivní chemické prostředí.	Beton vystavený rostlé zemině a podzemní vodě.

2 VYBRANÉ PŘÍČINY PORUCH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Na trvanlivost betonových konstrukcí má vliv několik parametrů. Jedním z nejčastějších je působení okolního prostředí a střídavé působení kladných a záporných teplot. Tyto dva vlivy budou probrány v následujících kapitolách.

2.1 KARBONATACE BETONU

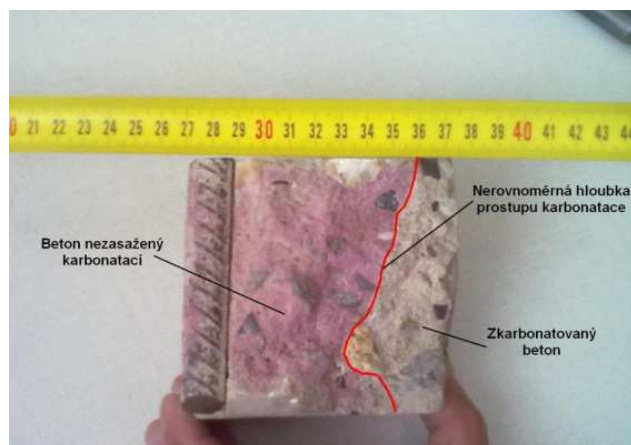
Karbonatace betonu je jev závislý na několika parametrech, kterými jsou například propustnost betonu, která je závislá na jednotlivých složkách betonu a na jeho složení, zpracování a ošetřování, dále také tloušťka krycí vrstvy, teplota a relativní vlhkost vzduchu či množství oxidu uhličitého CO_2 v okolním prostředí.

Čerstvě zatuhlý beton má přirozenou ochranu ocelové výztuže před korozí. Když je beton v bezporuchovém stavu, je alkalický a jeho $\text{pH}=12,5$ (je nezkarbonovaný). Ocelová výztuž je díky uložení do betonu s krycí vrstvou chráněna proti působení koroze a vnějším vlivům. Ve chvíli, kdy se beton stane více porézní vlivem okolního prostředí a atmosférických podmínek, nastává problém. Mikropóry neošetřeného povrchu betonu mají tendenci začít sát vzdušnou vlhkost do vnitřní struktury betonu. Do betonu tak proniká vlhkost a oxid uhličitý. Když pH klesne pod hodnotu 9, je způsobena karbonatace [14].

2.1.1 Určení míry karbonatace betonu pomocí fyzického měření

Nejčastější metoda pro stanovení hloubky karbonatační vrstvy betonu jako ochrany výztuže k zajištění plánované životnosti konstrukce je měření přímo na konstrukci pomocí indikátoru fenolftaleinu.

Zkušební metoda pomocí fenolftaleinu je určená k měření hloubky zkarbonatované vrstvy v blízkosti povrchu ztvrdlého betonu. Pro takovéto měření se používá 1% roztok fenolftaleinu, případně 10% kyselina chlorovodíková. Plocha betonu, která se při reakci s roztokem fenolftaleinu zbarví do červeno-fialova má hodnotu $\text{pH} > 9,5$, je tedy karbonatací nezasažena. U vzorků, u kterých ke zbarvení povrchu nedojde, je zřejmé, že oblast je nebezpečná z hlediska ochrany betonářské výztuže, protože hodnota pH je pod 9,5 a při této hodnotě výztuž začíná korodovat [30].



Obr. 5 Fenolftaleinový test karbonátace [26]

Zkouška může být provedena jak na staveništi, tak v laboratoři, na zkušebních vzorcích nebo na úlomcích odebraných ze ztvrdlého betonu. Pro stanovení hloubky karbonátace v terénu však není vždy nutné odsekávat části povrchu nebo provádět jádrový vývrt. Konstrukci stačí navrtávat a u toho sbírat prach vynášený vrtákem. Na materiálu odebraném z různé hloubky se provede orientační zkouška pomocí fenolftaleinu [30].

Méně používané metody pro zjištění pH se provádí pouze laboratorními rozbory:

- stanovení pH betonu na výluhu;
- chemicky rozbor materiálu;
- rentgenová difrakční analýza (RTG);
- diferenční termická analýza (DTA) [15].

2.1.2 Ověření životnosti konstrukce z hlediska karbonátace výpočtem dle ISO 16204

V případě zvolení výpočtu pro zjištění míry karbonatační hloubky je důležité se soustředit na zvolení správného výpočtového modelu a co nejreálnějších výpočetních parametrů jako jsou vstupní údaje a údaje vnějšího prostředí v okolí konstrukce. Často nebývá jednoduché tyto parametry získat dostatečně spolehlivé a výsledek se může odchylovat od reality [3].

Ověření plně pravděpodobnostní metodou

Při ověření touto metodou jsou důležité tři zásady:

- pravděpodobnostní modely se použijí takové, které jsou dostatečně ověřeny a dávají realistické a reprezentativní výsledky;
- parametry použitých modelů a jejich pochybnosti musí být kvantifikovatelné pomocí testů, pozorování nebo zkušeností;
- reprodukovatelné a příslušné zkušební metody musí být k dispozici k posouzení akce a materiálových parametrů. Nejistoty spojené s modely a zkušební metody musí být vzaty v úvahu.

Pro ověření mezního stavu z hlediska depasivace musí být splněny následující podmínky:

$$p\{\} = p_{dep} = p\{a - x_c(t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (2)$$

kde:

- $p\{\}$ pravděpodobnost, že dojde k depasivaci;
- a krycí vrstva betonu [mm];
- $x_c(t_{SL})$ hloubka karbonatace v době t_{SL} , [mm];
- t_{SL} životnost [roky];
- p_0 pravděpodobnost poruchy [3].

Ověření vyhovující metodou

Vyhovující metoda je soubor pravidel pro:

- dimenzování,
- výběr materiálu,
- postupy provádění.

Aby bylo zajištěno, že cíl spolehlivosti nepřekročí příslušný mezní stav v průběhu životnosti konstrukce, když betonová konstrukce nebo komponenta je vystavena návrhovým situacím.

Konkrétní požadavky pro návrh a výběr materiálů, při ověření vyhovující metodou, se určí jedním ze dvou způsobů:

- na základě statistického vyhodnocení experimentálních dat a pozorování v terénu;
- na základě kalibrace dlouholetých zkušeností stavebních tradic [3].

Ověření metodou vyhnutí se degradaci

Způsob metody vyhnutí se degradaci znamená, že proces zhoršení nebude probíhat v důsledku, například:

- použitím jiných reagujících materiálů, např. některé korozi-vzdorné oceli nebo alkalicky nereagující kamenivo;
- oddělení reakčních složek, např. udržování konstrukce nebo součástí pod kritickou mírou vlhkosti;
- potlačení škodlivých reakcí např. elektrochemickými metodami.

Konkrétní požadavky pro návrh a výběr materiálů, při ověření metodou vyhnutí se degradaci, se v zásadě mohou stanovit stejným způsobem, jako pro vyhovující metodu [3].

Ověření metodou dílčích součinitelů

Jsou použity stejné modely, jako jsou použity pro plně pravděpodobnostní metodu, ale na základě návrhových hodnot musí být použita metoda dílčího součinitele. Zjednodušení jsou povolena na bezpečnou stranu.

Metoda dílčího součinitele odděluje ošetření nejistot a proměnných pocházejících z různých příčin. Při postupu ověřování mezního stavu z hlediska vzniku karbonatace jsou definované v mezinárodní normě ISO 16204 [3] takto:

$$a_d - x_{c,d}(t_{SL}) \geq 0 \quad (3)$$

kde:

- a_d návrhová hodnota krytí výztuže [mm];
- $x_{c,d}(t_{SL})$ návrhová hodnota hloubky karbonatace v čase (t_{SL}) [mm].

Návrhová hodnota betonové krycí vrstvy a_d se vypočte takto:

$$a_d = a_{nom} \cdot \Delta a \quad (4)$$

kde:

- a_{nom} jmenovitá hodnota pro krytí výztuže [mm];
- Δa míra bezpečnosti (povolená odchylka) betonového krytu [mm].

Návrhová hodnota hloubky karbonatace, v době (t_{SL}), $x_{c,d}(t_{SL})$ se vypočítá následujícím způsobem:

$$x_{c,d}(t_{SL}) = x_{c,k}(t_{SL}) \cdot \gamma_f \quad (5)$$

kde:

- $x_{c,k}(t_{SL})$ charakteristická hodnota hloubky karbonatace v době, (t_{SL}) [mm],
- γ_f dílčí bezpečnostní faktor hloubky karbonatace [-].

Dílčí součinitel musí vzít v úvahu:

- možnost nepříznivých odchylek akčních hodnot z reprezentativních (typických) hodnot;
- možnost nepříznivých odchylek materiálů a vlastností výrobků z reprezentativních hodnot;
- modelové nejistoty a rozměrové změny.

Číselné hodnoty dílčích faktorů se určí jedním z následujících dvou způsobů:

- na základě statistického vyhodnocení experimentálních dat a pozorování v terénu podle plně pravděpodobností metody, nebo
- na základě kalibrace dlouholetých zkušeností stavebních tradic.

Diplomová práce bude zaměřena právě na tento výpočetní model, proto je uveden celý postup výpočtu.

Návrhová hodnota hloubky karbonatace, v době (t_{SL}) , $x_{c,d}(t_{SL})$ dle fib [16] je definována takto:

$$x_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2 k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot (k_{t,d} \cdot R_{ACC,0,k}^{-1} \cdot \gamma_R + \epsilon_{t,d}) \cdot C_{S,d} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})} \quad (6)$$

kde:

- t_{SL} určena z tabulky Informativní návrhové životnosti z ČSN 1992 [roky]
- $k_{c,d}$ návrhová hodnota parametru provedení [-]
- $k_{t,d}$ návrhová hodnota regresního parametru [-]
- $R_{ACC,0,k}^{-1}$ charakteristická hodnota efektivní odolnosti proti karbonataci [(mm²/roky)/(kg/m³)]
- γ_R bezpečnostní součinitel pro inverzní karbonataci odolnosti betonu [-]
- $\epsilon_{t,d}$ návrhová hodnota chyby termínu [-]
- $C_{S,d}$ návrhová hodnota koncentrace oxidu uhličitého [kg/m³]

- $W(t_{SL})$ funkce počasí v čase [-]

Návrhová hodnota funkce v oblasti životního prostředí $k_{e,d}$ se vypočte takto:

$$k_{e,d} = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real,k}}{\gamma_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (7)$$

kde:

- $RH_{real,k}$ charakteristická hodnota relativní vlhkosti vzduchu [%]
- RH_{ref} referenční relativní vlhkost [%]
- f_e exponent [-]
- g_e exponent [-]
- γ_{RH} bezpečnostní součinitel relativní vlhkosti RH_{real} [-]

Návrhová hodnota parametru provedení $k_{c,d}$ se vypočte buď dle vzorce:

$$k_{c,d} = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c} \quad (8)$$

kde:

- b_c exponent regrese [-]
- t_c doba ošetřování [dny]

nebo následující tabulkou:

Tab. 6 Hodnota parametru provedení pro různé doby ošetření [16]

do ošetřování t_c [dny]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$k_{c,d}$ [-]	3,00	2,03	1,61	1,37	1,20	1,09	1,00	0,92	0,86	0,81	0,77	0,73	0,70	0,67

Charakteristická hodnota efektivní odolnosti proti karbonataci $R_{ACC,0,k}^{-1}$ byla uvažována s výpočtem inverzní efektivní odolnosti proti karbonataci pomocí zrychleného karbonatačního testu – ACC test, ve kterém jsou suché betonové vzorky testovány pro referenční dobu t_0 . Inverzní odolnost proti karbonataci $R_{NAC,0}^{-1}$ určená za přírodních karbonatačních podmínek (NAC – Natural Carbonation Conditions) bude větší o průměrný faktor $A = 1,25$. To lze vysvětlit tím, že ve zrychleném testu dosahuje vysušení do větší hloubky než za přírodních podmínek (ačkoliv se testování provádí za stejných klimatických podmínek). Tento jev vede

k mírnému zbrždění karbonatačního procesu v případě ACC testu. Pro velmi suchý beton tedy teoreticky platí hodnota $R_{ACC,0}^{-1} = 0$ [16].

Pro měření odolnosti proti karbonataci lze využít přímé (měření hloubky karbonatace např. ACC testem) a nepřímé testovací metody (měření plynové permeability). Výhody ACC testu jsou následující:

- vazebná kapacita betonu nemusí být dodatečně uvažována;
- změny odporu syčení oxidem uhličitým v důsledku karbonatace nemusí být uvažovány;
- dobrá reprodukovatelnost výsledků testu;
- krátká doba trvání.

Pokud nejsou pro $R_{ACC,0}^{-1}$ dostupná naměřená data z testu, může být pro orientační účely využito literárních údajů uvedených v následující tabulce.

Tab. 7 Lineární hodnoty $R_{ACC,0,k}^{-1}$ [3]

Typ cementu	ω_{eff}^1					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I 42,5 R	-	3,1	5,2	6,8	9,8	13,4
CEM I 42,5 R + FA (k=0,5)	-	0,3	1,9	2,4	6,5	8,3
CEM I 42,5 R + SF (k=2,0)	3,5	5,5	-	-	16,5	-
CEM III/B 42,5	-	83	16,9	26,6	44,3	80

Pozn.: ω_{eff}^1 – efektivní vodní součinitel zohledňující FA (popílek) a SF (křemičité úlety) s využitím uvedené k-hodnoty

Návrhová hodnota koncentrace oxidu uhličitého $C_{S,d}$ se vypočte takto:

$$C_{S,d} = C_{S,atm.} + C_{S,emi.} \quad (9)$$

kde:

- $C_{S,atm.}$ koncentrace CO_2 v atmosféře [kg/m^3]
- $C_{S,emi.}$ další koncentrát oxidu uhličitého v důsledku emisních zdrojů [kg/m^3]

Funkce počasí v čase $W(t_{SL})$ se vypočte takto:

$$W(t_{SL}) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot t_0 \cdot W)^{b_w}}{2}} \quad (10)$$

kde:

- t_0 čas reference [roky]

- p_{SR} pravděpodobnost deště [-]
- b_w exponent regrese [-]
- ToW doba vlhkosti [-]

Doba vlhkosti ToW se vypočte takto:

$$ToW = \frac{\text{dešťové dny } h_{Nd} \geq 2,5 \text{ mm srážek v roce}}{365} \quad (11)$$

2.1.3 Etapy karbonatace

V prvním období karbonatace se přeměňuje oxid uhličitý s hydroxidem vápenatým v mezizrnném prostoru na nerozpustný uhličitán vápenatý, který částečně zaplňuje póry betonu. Mechanické vlastnosti se v tomto stádiu stávají výhodnějšími z důvodu snížení pórovitosti cementového tmelu a dochází ke zvýšení odolnosti proti působení agresivních látek [17].

Ostatní hydratační produkty cementu (hydratované křemičitany, hlinitany vápenaté) karbonatují ve druhém období. Vznikají modifikace uhličitánu vápenatého společně s amorfním gelem kyseliny křemičité, které však zůstávají v pseudomorfózách po hydratačních zplodinách maltovin. Uhličitán vápenatý se vyskytuje ve formě jemnozrnných krystalů. Mechanické vlastnosti betonu se příliš nemění a pohybují se kolem původních hodnot [34].

Třetí období karbonatace se vyznačuje překrystalováním dříve vzniklých jemnozrnných útvarů uhličitánu vápenatého. Ve velkém počtu a s velkým rozměrem vznikají krystaly kalcitu a aragonitu. Vlivem zvýšené vlhkosti a zvýšením teploty může docházet k přechodu z méně stálé modifikace uhličitánu vápenatého na modifikace stálejší. Během tohoto období se mechanické vlastnosti postupně zhoršují, výrazně se snižuje hodnota pH betonu.

Ve čtvrtém období dochází k téměř úplné (stoprocentní) karbonataci, velké krystaly kalcitu a anagonitu procházejí celou strukturou cementového tmelu, dochází k rozpadu a ke ztrátě pevnosti betonu.

Rychlost karbonatace je ovlivňována vlhkostí. Když je beton proschlý, karbonatace se zastavuje. Nutno poznamenat, že v případě 1. a 2. období karbontace je přítomnost vlhkosti nutná z chemického hlediska. Ovšem ve 3. a 4. období je zvýšení vlhkosti rozhodující

pro proces karbonatace. Nejvíce účinné je také působení vody, bez které by krystaly aragonitu ani kalcitu nemohly vzniknout.

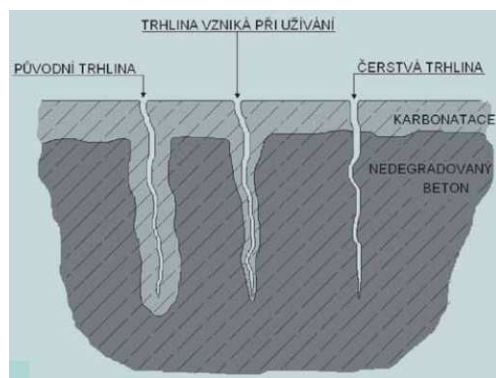
U většiny konstrukcí dosahuje karbonatace maximálně druhého období, příp. začátku třetího období, konstrukce dosahující třetího a čtvrtého období karbonatace se objevují spíše výjimečně (v případě intenzivních zdrojů CO_2) [17].

2.1.4 Karbonatace s vlivem trhlin

Když je beton bez trhlin, oxid uhličitý proniká rovnoměrně do vnitřní struktury betonu difuzí, tzn. že množství oxidu uhličitého, který do hloubky betonu proniká, je relativně malé a míra vzniku karbonatace je také nízká.

V případě vzniku trhlin vznikají narušená místa betonu, kterými mohou vnikat plyny z vnějšího prostředí do struktury betonu. Trhliny jsou místa vytvářející podmínky pro vznik a rozvoj karbonatace. Srovnáním míry karbonatace povrchu betonu, který byl vystaven prostředí po celou dobu užívání konstrukce, s mírou karbonatace betonu, který se nachází v blízkosti trhlin, můžeme pak posoudit dobu vzniku trhliny – původní trhlina, trhlina vzniklá při užívání a čerstvá trhlina.

- Původní trhlina – karbonatace vznikla už při procesu výstavby konstrukce nebo hned po zahájení užívání konstrukce, hloubka karbonatace uvnitř struktury v okolí trhliny betonu je stejná jako na povrchu konstrukce.
- Trhlina vzniklá při užívání – vznik karbonatace v okolí trhliny je dlouhodobý, vzniká postupným užíváním konstrukce, k degradaci betonu v okolí trhliny dochází postupně, je tedy odlišná míra hloubky karbonatace na povrchu a na konci trhliny.
- Čerstvá trhlina – trhlina vzniklá před nedávnou dobou, ke karbonataci ještě nedošlo nebo pouze v malé míře [18].



Obr. 6 Míra karbonatace betonu v okolí trhlin [18]

2.2 MRAZUVZDORNOST BETONU

Dlouhodobá funkčnost betonových konstrukcí, především inženýrských děl jako jsou např. mostní objekty, je také závislá na odolnosti povrchu betonu proti účinkům mrazu a chemických rozmrazovacích látek a na mrazuvzdornosti betonu. Zkoušky mrazuvzdornosti jsou náročné na zajištění přístrojového vybavení a hlavně na vytvoření zkušebního modelu, jehož prostředí bude co nejpodobnější skutečnému prostředí [19].

2.2.1. Určení mrazuvzdornosti betonu pomocí fyzického měření

Dle ČSN 73 1322 – mrazuvzdornost betonu

Podstata zkoušky mrazuvzdornosti betonu dle normy ČSN 73 1322 spočívá ve střídavém zmrazování a rozmrazování vodou nasycených betonových zkušebních těles s takovým počtem cyklů, se kterým se stanoví míra porušení zkušebních těles.

Betonová zkušební tělesa jsou před zkouškou mrazuvzdornosti ve většině případů uložena na určitý počet dní do vlhkého prostředí a do vody, počet dní je rozdílný podle druhu použitého cementu. V případě, že zkušební těleso je vyjmuto ze zkoušené konstrukce, před zkouškou se 3 dny nasycuje vodou [21].

Zkušební tělesa pro zkoušku pevnosti v tahu ohybem jsou celá a neporušená, čtvercového průřezu o rozměrech 100x100x400 mm bez vyztužení. Počet zkušebních těles se stanoví v závislosti na počtu rozmrazovacích cyklů a počtu mezilehlých kontrol. Pro každou etapu je však nutné zhotovení jedné sady (nejméně tři kusy) rozmrazovaných a jedné sady nerozmrazovaných zkušebních těles [22].

Postup zkoušky je proveden v rozmrazovacích cyklech, jeden cyklus se skládá ze čtyř hodin zmrazování, při kterém musí být teplota mrazicího prostředí v mezích od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo od $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, a dvou hodin rozmrazování, při kterém se zkušební tělesa ukládají do vody s teplotou $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po provedení všech etap se zkušební trámce osuší na povrchu, změří se jejich rozměry, hmotnost a vypočte se objemová hmotnost, poté je možno zkoušet zkušební trámce na pevnost v tahu ohybem a také pevnost v tlaku na koncích těles [35].



Obr. 7 Zjišťování pevnosti v tahu ohybem, hranol ve zkušebním lisu [20]

Výsledkem zkoušky i každé ukončené etapy je zjištění:

- úbytku hmotnosti zkušebních zmrazovaných těles v % hmotnosti;
- pevnosti betonu v tahu ohybem i pevnost v tlaku;
- součinitele mrazuvzdornosti betonu;
- změny parametru nedestruktivní metody [20].

Dle ČSN 73 1380 – porušení vnitřní struktury

Princip metody zkoušky odolnosti proti porušení vnitřní struktury betonu dle normy ČSN 73 1380 [22] se skládá z určení dynamických modulů pružnosti. Z doby průchodu ultrazvukových (dále též jen UZ) impulsů nebo vlastní příčné frekvence a následného výpočtu změny dynamického modulu pružnosti po 56 zkušebních zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech. Norma zahrnuje celkem tři metody zjišťování porušení vnitřní struktury a žádná z nich není určena jako referenční. Jedná se o zkoušku na trámci, zkoušku na desce a zkoušku CIF [20]. Zkoušky CIF a zkoušky na desce jsou pracné a nejsou příliš citlivé, v České republice se nepoužívají. Jako nejpříjemnější se jeví zkouška na trámci, která je snadno proveditelná a nejvíce koresponduje svým zkušebním postupem se zkouškou z normy ČSN 73 1322 [21]. Ve zkoušce popsané v předešlé kapitole je důraz kladen na destruktivní zkoušení betonu (pevnost v tahu ohybem) pomocí ultrazvukové a rezonanční metody. Naopak dle této normy se zkouší pouze nedestruktivně použitím veličiny relativní dynamický modul RDM.

Pro zkoušku střídavého zmrazování a rozmrazování je použito zkušební těleso, je to trámec čtvercového průřezu o rozměrech 100x100x400 mm. Pro provedení zkoušky je vhodné použít alespoň tři trámcce [23].

Při stanovení příčné vlastní frekvence musí být těleso uloženo na pružnou podložku (např. molitan) a poté se umístí snímač pro měření frekvence. Mechanickým impulsem (např. kladívkem) je vyvoláno kmitání částic zkušebního trámce a hodnota uvedená snímačem se zaznamená a alespoň třikrát opakuje.

Při stanovení doby průchodu ultrazvukových impulsů se použije ultrazvukový přístroj. Budiče a snímače jsou vždy umístěny na protilehlé strany trámce. Doba průchodu ultrazvukového vlnění se snímá a sondy jsou k trámci přitlačovány stejnou silou.

Zkouška zmrazování a rozmrazování může začít až po 28 dnech od zhotovení zkušebních trámů. Zmrazovací fáze pro každý cyklus trvá 8 hodin, rozmrazovací fáze trvá 4 hodiny a zkoušené těleso je při něm poléváno vodou o teplotě 13 ± 8 °C nebo je do ní ponořeno. Jeden cyklus tedy trvá 12 hodin. Další nevýhodou této metody je absence hodnocení kritéria pro mrazuvzdornost betonu, ovšem lze předpokládat, že při poklesu modulu pružnosti o 25 % beton nelze považovat za mrazuvzdorný [35].

Pro vyhodnocení porušení vnitřní struktury betonového zkušebního trámce je použito hodnot relativního dynamického modulu, průměrná hodnota a směrodatná odchylka z každého zkušebního trámce [23].

2.2.2 Ověření životnosti konstrukce z hlediska mrazuvzdornosti výpočtem dle ISO 16204

Ověření plně pravděpodobnostní metodou

Následující funkce mezního stavu musí být splněny:

$$p\{\} = p_{zmrazení/rozmrazení} = p\{T(t < f_{SL}, S_{CR} - S_{ACT}(t < t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (12)$$

kde:

- $p\{\}$ pravděpodobnost, že dojde k poškození zmrazování / rozmrazování;
- S_{CR} kritický stupeň nasycení [-];
- $S_{ACT}(t)$ skutečný stupeň nasycení v čase t [-];
- $T(t)$ konkrétní teplota v době [°C];
- t_{SL} návrh životnost [roky];
- p_0 pravděpodobnost poruchy.

Proměnné S_{CR} a $S_{ACT}(t)$ musí být kvantifikovány v plně pravděpodobnostním přístupu [3].

Ověření vyhovující metodou

V rámci tohoto přístupu jeden nebo více z následujících opravných prostředků jsou potřebné, na základě kalibrace dlouhodobých zkušeností:

- omezení pórovitosti betonu (tradičně vyjádřená poměrem voda / cement);
- k dispozici prostor pro rozpětí mrznoucí vody (provzdušnění);
- volba typu cementu a kameniva [3].

Ověření metodou vyhnutí se degradaci

Obecně platí, že se lze vyhnout degradaci, pokud se zmrazování/rozmrazování nemůže uskutečnit kvůli nekonečnému odporu materiálu nebo nulovému zatížení životního prostředí.

Z důvodu absence mrazu nebo vlhkosti budou jakékoliv škodlivé reakce pod úrovní kritického stupně nasycení S_{CR} , proto se důsledku zmrazení vyhne většina staveb [3].

Ověření metodou dílčího součinitele

Musí být splněny tyto funkce mezního stavu:

$$S_{CR,d} - S_{ACT,d}(t < t_{SL}) \geq 0 \quad (13)$$

kde:

- $S_{CR,d}$ návrhová hodnota kritického stupně nasycení [-];
- $S_{ACT,d}(t < t_{SL})$ návrhová hodnota skutečného stupně nasycení v čase t [-];
- t_{SL} životnost [roky] [3].

Návrhová hodnota kritického stupně nasycení $S_{CR,d}$, se vypočte takto:

$$S_{CR,d} = S_{CR,min} - \Delta S_{CR} \quad (14)$$

kde:

- $S_{CR,min}$ charakteristická hodnota kritického stupně nasycení (minimální hodnota);
- ΔS_{CR} okraj aktuálního kritického stupně nasycení [30].

Návrhová hodnota skutečného stupně nasycení v čase $S_{ACT,d(t)}$, se vypočítá takto:

$$S_{ACT,d(t)} = S_{ACT,k(t)} + \Delta S_{ACT} \quad (15)$$

kde:

- $S_{ACT,k(t)}$ charakteristická hodnota skutečného stupně nasycení v době t ;
- ΔS_{ACT} rozpětí skutečného stupně nasycení (zatížení) [31].

Metoda dílčího součinitele pro ověření životnosti betonových konstrukcí bude v diplomové práci rozebrána a doplněna o potřebné parametry a vzorce z modelu fib [16].

$$S_{ACT}(t < t_{SL}) = S_n + e \cdot t_{eq}^d \quad (16)$$

kde:

- S_n hodnota bodu zlomu nasycení tzv. „knick point“;
- e koeficient závislý na vodivosti vzduchu;
- t_{eq} životnost konstrukce závislá na době vlhkosti [roky];
- d koeficient absorpce vody závislý na velikosti pórů vzduchu [32].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Při provedení každé rizikové analýzy je důležité v počátku posoudit rizika, která mohou nastat, identifikovat je a následně na ně provést rizikovou analýzu. Pro vytvoření rizikové analýzy je nutno respektovat náležitosti patřící k analýze a také názory, fakta, zkušenosti a znalosti i dalších odborníků. Ve fázi, kdy jsou známy výsledky analýzy je nutné možná rizika ohodnotit a navrhnout jejich ošetření a možná opatření, které pomohou vyhnout se nepříznivým následkům [28].

Rizikové analýzy vypomáhají pochopit možná rizika a následné důsledky, které mohou nastat. Pomohou také rozhodnout, zdali je nutné riziko ošetřit a jaké jsou nejvhodnější způsoby ošetření. Do analýzy je nutné zahrnout příčiny a zdroje rizik, následky a pravděpodobnost, zdali se následky mohou vyskytnout. Faktory ovlivňující následky je nutno také identifikovat [29].

Tato část diplomové práce bude věnována výpočetním analýzám, které budou využity jako výpočetní modely životnosti konstrukce z hlediska karbonatace betonu a mrazuvzdornosti betonu. Tyto dvě poruchy jsou častým problémem betonových konstrukcí, proto analýzy z normy ISO 16204 [3] je potřeba otestovat a porovnat s výsledky měření v laboratořích.

V analýze karbonatace i mrazuvzdornosti betonu budou porovnány čtyři receptury betonu, které jsou svými vlastnostmi odlišné, aby výsledek byl zřetelný. V analýze na karbonataci betonu byly zvoleny pro porovnání ještě další dvě receptury, které jsou zajímavé svým složením a přidanými přísadami.

3.1 RECEPTURY BETONU

Receptury, tj. zvolení druhů materiálu a obsahu složení betonu, byly zvoleny na doporučení vedoucího diplomové práce. Dle předchozího odstavce první čtyři receptury slouží pro výpočetní analýzu hloubky karbonatace betonu i mrazuvzdornosti a receptury 5. a 6. jsou zvoleny pouze pro výpočet hloubky karbonatace, aby byl vyzkoušen i jiný druh betonu s jinými přísadami. Ve druhé receptuře je obsažena plastifikační přísada v množství 0,25 % z hmotnosti cementu, ve třetí receptuře je poté stejná přísada v množství 0,50 % z hmotnosti cementu. Množství 0,50 % je obvykle používaná dávka plastifikátoru, proto je pro zjednodušení dále uváděno množství přísady 50 % ve druhé receptuře a 100 % v receptuře třetí.

3.1.1 První receptura

Tab. 8 První receptura čerstvého betonu

1. RECEPTURA CEM I 42,5 R bez přísad		
CEM I 42,5 R	308	[kg/m ³]
Bratčice 0-4	925	[kg/m ³]
Olbramovice 4-8	182	[kg/m ³]
Olbramovice 8-16	696	[kg/m ³]
Voda	203	[kg/m ³]
Vodní součinitel	0,61	-

3.1.2 Druhá receptura

Tab. 9 Druhá receptura čerstvého betonu

2. RECEPTURA CEM I 42,5 R s přísadami 50 %		
CEM I 42,5 R	295	[kg/m ³]
Bratčice 0-4	927	[kg/m ³]
Olbramovice 4-8	185	[kg/m ³]
Olbramovice 8-16	689	[kg/m ³]
Voda	177	[kg/m ³]
Sika ViscoCrete 4035	0,71	[kg/m ³]
Vodní součinitel	0,55	-

3.1.3 Třetí receptura

Tab. 10 Třetí receptura čerstvého betonu

3. RECEPTURA CEM I 42,5 R s přísadami 100 %		
CEM I 42,5 R	338	[kg/m ³]
Bratčice 0-4	905	[kg/m ³]
Olbramovice 4-8	183	[kg/m ³]
Olbramovice 8-16	667	[kg/m ³]
Voda	176	[kg/m ³]
Sika ViscoCrete 4035	1,77	[kg/m ³]
Vodní součinitel	0,48	-

3.1.4 Čtvrtá receptura

Tab. 11 Čtvrtá receptura čerstvého betonu

4. RECEPTURA CEM I 42,5 R – provzdušněný beton		
CEM I 42,5 R	393	[kg/m ³]
Bratčice 0-4	816	[kg/m ³]
Olbramovice 4-8	183	[kg/m ³]
Olbramovice 8-16	694	[kg/m ³]
Voda	171	[kg/m ³]
Sika ViscoCrete 4035	2,05	[kg/m ³]
Sika LPS A 94	0,71	[kg/m ³]
Vodní součinitel	0,40	-

3.1.5 Pátá receptura

Tab. 12 Pátá receptura čerstvého betonu

5. RECEPTURA CEM I 42,5 R + popílek		
CEM I 42,5 R	285	[kg/m ³]
Bratčice 0-4	817	[kg/m ³]
Olbramovice 4-8	182	[kg/m ³]
Olbramovice 8-16	734	[kg/m ³]
Voda	190	[kg/m ³]
Popílek	100	[kg/m ³]
Super-plastifikátor	1,40	[kg/m ³]
Vodní součinitel	0,66	-

3.1.6 Šestá receptura

Tab. 13 Šestá receptura čerstvého betonu

6. RECEPTURA - CEM III/B 42,5 R		
CEM III 42,5 R	330	[kg/m ³]
Bratčice 0-4	862	[kg/m ³]
Olbramovice 4-8	182	[kg/m ³]
Olbramovice 8-16	734	[kg/m ³]
Voda	175	[kg/m ³]
Popílek	60	[kg/m ³]
Super-plastifikátor	2	[kg/m ³]
Vodní součinitel	0,53	-

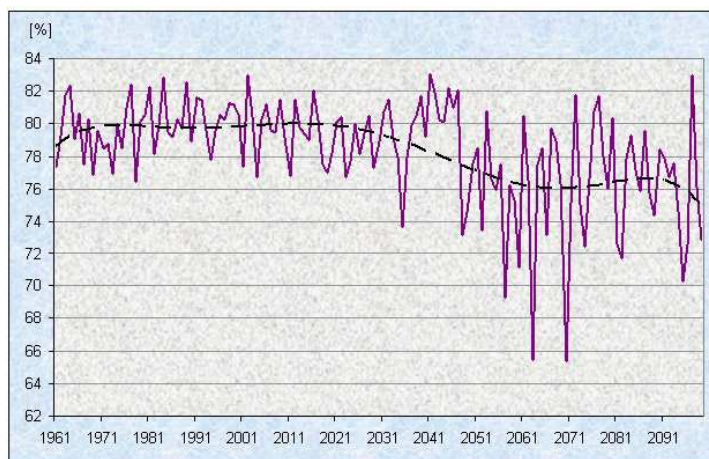
3.2 URČENÍ MÍRY KARBONATACE METODOU DÍLČÍCH SOUČINITELŮ

Karbonatace je jeden z nejčastějších problémů betonových konstrukcí. Téměř každá železobetonová konstrukce podlehne této „nemoci“, proto je často zmiňována, zkoumána a rozebírána. Z tohoto důvodu bude jedna z méně používaných metod vyzkoušena a porovnána.

Bude rozebrán výpočet hloubky karbonatace metodou dílčích součinitelů podle normy ISO 16204 [3] a podle fib [16]. Životnost konstrukce je uvažována 100 let, dle Tab. 1 Informativní návrhová životnost, se jedná o stavbu inženýrského typu. Stavba bude provedena v Jihomoravském kraji na okraji Brna, pro tuto lokalitu jsou zjištěny hodnoty aktuálního prostředí potřebné k výpočtu. Prostředí je zařazeno dle Tab. 5 Stupně vlivu prostředí do třídy XC4 jako střídavě mokré a suché. K výstavbě je zvoleno šest druhů betonů s různými recepturami, aby rozdíl karbonatační hloubky u každého z nich byl zřetelný.

Pro výpočet růstu hloubky karbonatace je zapotřebí určení několika parametrů. Výpočet bude proveden dle vzorce (6).

Relativní vlhkost vzduchu $RH_{real,k}$ lze vysvětlit jako poměr skutečné hmotnosti vodní páry k maximální hmotnosti vodní páry při stejné teplotě. Dle českého hydrometeorologického ústavu je pro rok 2015 určen aktuální průměr relativní vlhkosti vzduchu 80 %.



Obr. 8 Průměrná relativní vlhkost vzduchu [24]

Referenční relativní vlhkost RH_{ref} okolního vzduchu je zvolena s ohledem na stanovení odolnosti betonu proti karbonataci. Součinitelé stanovené ACC testem, které jsou uvedené v Tab. 7 Lineární hodnoty $R_{ACC,0,k}^{-1}$, jsou stanoveny při referenční relativní

vlhkosti 65 %. Proto i v této použité metodě je zvolena referenční relativní vlhkost 65 %, která odpovídá teplotě 20 °C. Relativní vlhkost vzduchu a referenční relativní vlhkost jsou potřebné pro výpočet dle vzorce (7).

Návrhová hodnota parametru provedení je závislá na počtu dní, kdy bude beton ošetřován. Dle Tab. 6 Hodnota parametru provedení pro různé doby ošetření je zjištěna správná hodnota odpovídající potřebnému času pro ošetření. Ošetření betonu bude probíhat po dobu sedmi dnů.

Charakteristická hodnota efektivní odolnosti proti karbonataci $R_{ACC,0,k}^{-1}$ je zvolena pro každý model zvlášť dle Tab. 7 Lineární hodnoty $R_{ACC,0,k}^{-1}$, která je závislá především na vodním sočiniteli. Pro správnost výpočtu je výsledek převeden do správných jednotek.

Tab. 14 Lineární hodnota efektivní odolnosti proti karbonataci pro každou recepturu

	$R_{ACC,0,k}^{-1}$ [(mm ² /rok)/ (kgCO ₂ /m ³)]
1. receptura – CEM I 42,5 R bez přísad	4214,25
2. receptura – CEM I 42,5 R s přísadami 50 %	3082,06
3. receptura – CEM I 42,5 R s přísadami 100 %	1949,88
4. receptura – CEM I 42,5 R – provzdušněný beton	974,94
5. receptura – CEM I 42,5 R + popílek	5572,87
6. receptura – CEM III/B 42,5 R	11705,54

Návrhová hodnota koncentrace oxidu uhličitého $C_{S,d}$ je rovna součtu koncentrace CO₂ v atmosféře a dalších možných koncentrátů CO₂ v důsledku emisních zdrojů. V modelu fib [16] je naměřena střední hodnota a směrodatná odchylka. Pro výpočet je využita střední hodnota, která se rovná 0,00082 kg/m³.

Velký vliv na průběh karbonatace má samozřejmě počasí $W(t_{SL})$, které ovlivňuje především povrch betonové konstrukce. Počasí je ve výpočetním modelu zohledněno z hlediska průměrné vlhkosti a pravděpodobnosti deště. Průměrná vlhkost pro zjišťovanou lokalitu je rovna podílu počtu dní se srážkami, které jsou vyšší než 2,5 mm s celkovým počtem dní v roce. Pro rok 2015 bylo naměřeno 175 mm srážek. K tomuto výpočtu nám bude nápomocný vzorec (10) a (11).

Ostatní hodnoty jsou použity z fib [16]. V následující tabulce jsou vypsány parametry, které budou využity pro výpočty a které jsou pro všechny druhy čerstvých betonů totožné.

Výsledky výpočetní analýzy karbonatace betonu jsou přiloženy v části Příloha č. 1 – Výpočetní analýza – karbonatace betonu.

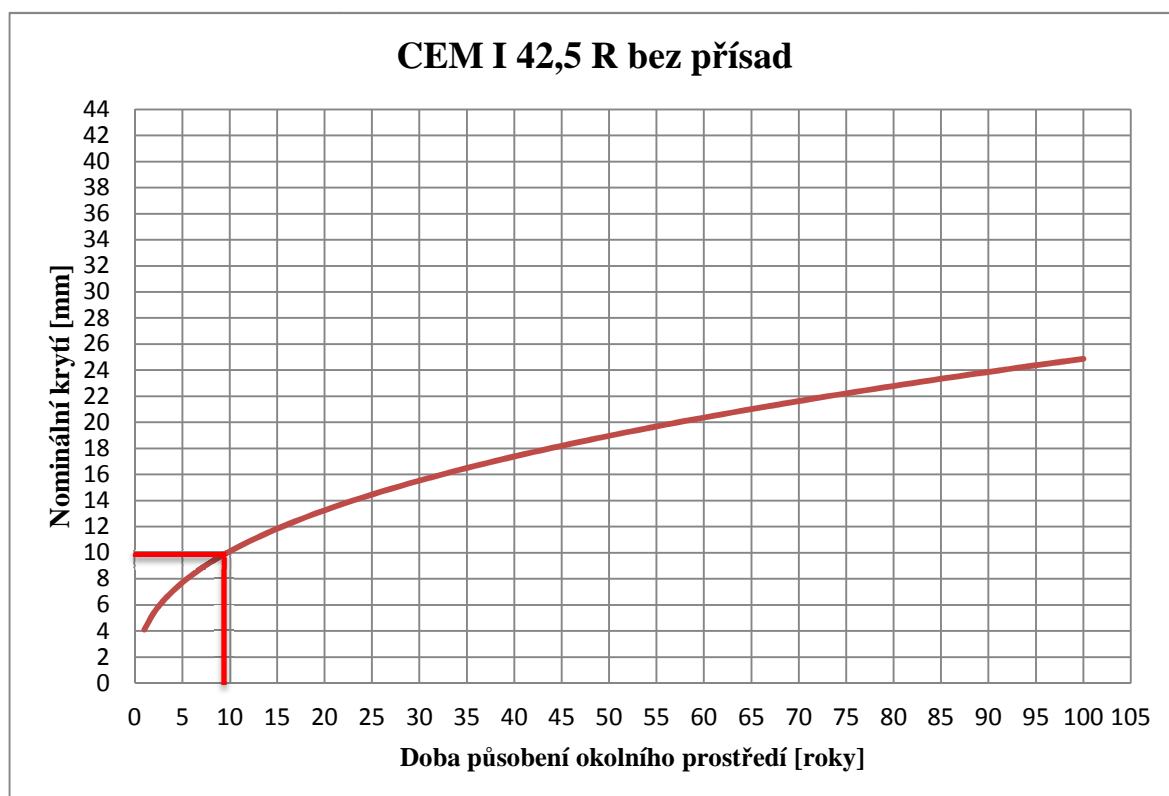
Tab. 15 Hodnoty parametrů pro analýzu karbonatace betonu

Parametr	Označení	Dílčí součinitel	Jednotka
Návrhová životnost	t_{SL}	1 až 100	roky
Návrhová hodnota funkce v oblasti životního prostředí	$k_{e,d}$	1,36115	-
Charakteristická hodnota relativní vlhkosti	$RH_{real,k}$	79	%
Referenční relativní vlhkost	RH_{ref}	65	%
Exponent	f_e	5	-
Exponent	g_e	2,5	-
Dílčí součinitel bezpečnosti pro relativní vlhkost	γ_{RH}	1,3	-
Návrhová hodnota regresního parametru	$k_{t,d}$	1,25	-
Návrhová hodnota parametru přenosového provedení	$k_{c,d}$	1,61675	-
Charakteristická hodnota odporu inverzní účinné karbonatace betonu	$R_{ACC,0,k}^{-1}$	11705,5	mm ² /rok
Dílčí bezpečnostní faktor inverzní karbonatace odolnosti betonu	γ_R	1,5	-
Návrhová hodnota chyby termínu	$\varepsilon_{t,d}$	315,5	-
Návrhová hodnota koncentrace CO ₂	$C_{s,d}$	0,00082	kg/m ³
Funkce počasí	$W(t_{SL})$		-
Čas reference	t_0	0,0767	roky
Doba vlhkosti	ToW	0,03761	-
Pravděpodobnost deště	p_{SR}	0,1	-
Návrhová hodnota zastánce regrese	$b_{w,d}$	0,49	-
Bezpečnostní rezerva krytí výztuže	Δa	10	mm
Dny se srážkami	h_{Nd}	13,7272	dny

3.3 VÝSLEDKY ANALÝZY HOUBKY KARBONATACE

3.3.1 Výsledek první receptury

Výsledné hodnoty analýzy jsou uvedeny v příloze č. 1 a následně je znázorněn jejich grafický výsledek.

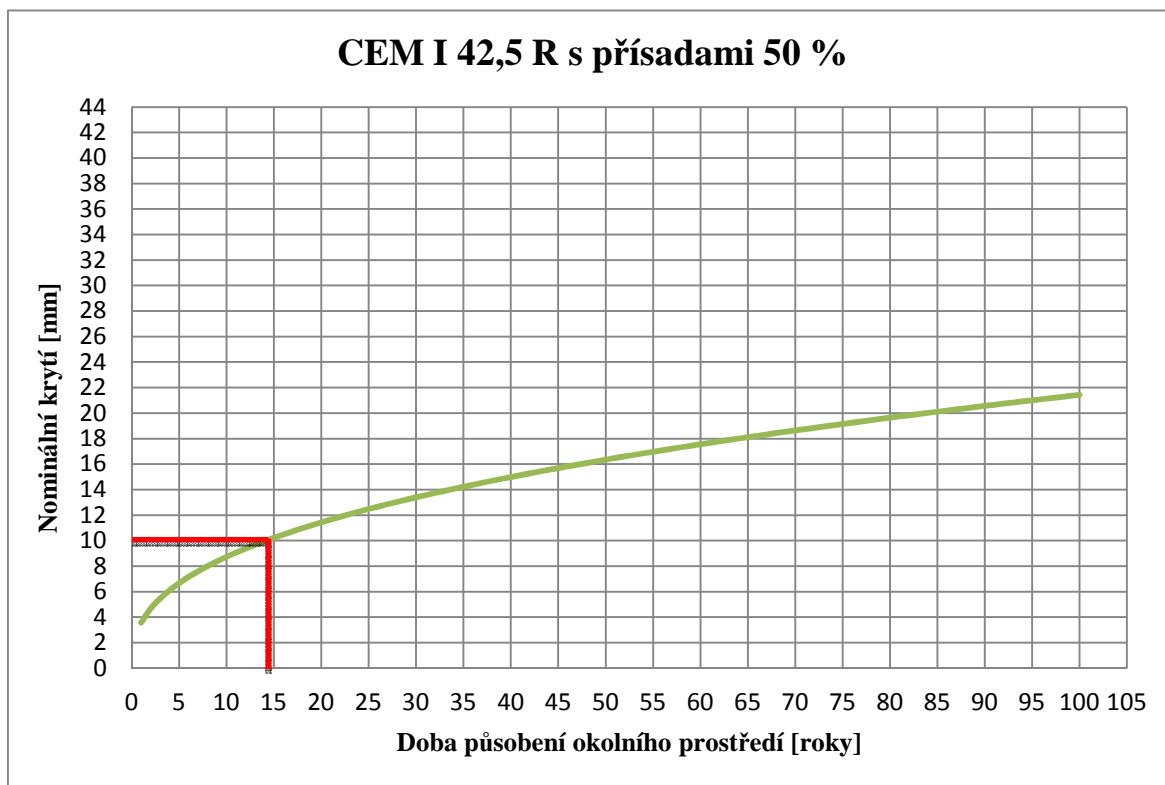


Obr. 9 Graf výsledků růstu hloubky karbonatice 1. receptury

Z grafu je zřejmé, že při použití této receptury betonu bude z počátku nárůst hloubky karbonatice rapidně stoupat a ve stáří deseti let se rychlost nárůstu lehce sníží, ale neustálí. Tento druh betonu, dle výsledků z výpočetní analýzy pro stavbu inženýrské stavby v této lokalitě, nedoporučuji. Bezpečnostní rezerva krytí betonu by byla překročena v 9. roce životnosti a ve věku 100 let by byla stavba poškozena karbonatací v rozsahu 25 mm, její životnost by tedy dosáhla velice nízkého věku. Velmi pravděpodobně by v brzké době musely proběhnout opravy, renovace nebo v nejhorším případě demolice a následně realizace nové stavby. Z technického ani ekonomického hlediska není dle výsledků výstavba z této receptury přijatelná.

3.3.2 Výsledek druhé receptury

V příloze č. 1 jsou uvedeny výsledné hodnoty analýzy karbonatace betonu, jejichž vyhodnocení je znázorněno v následujícím grafu.

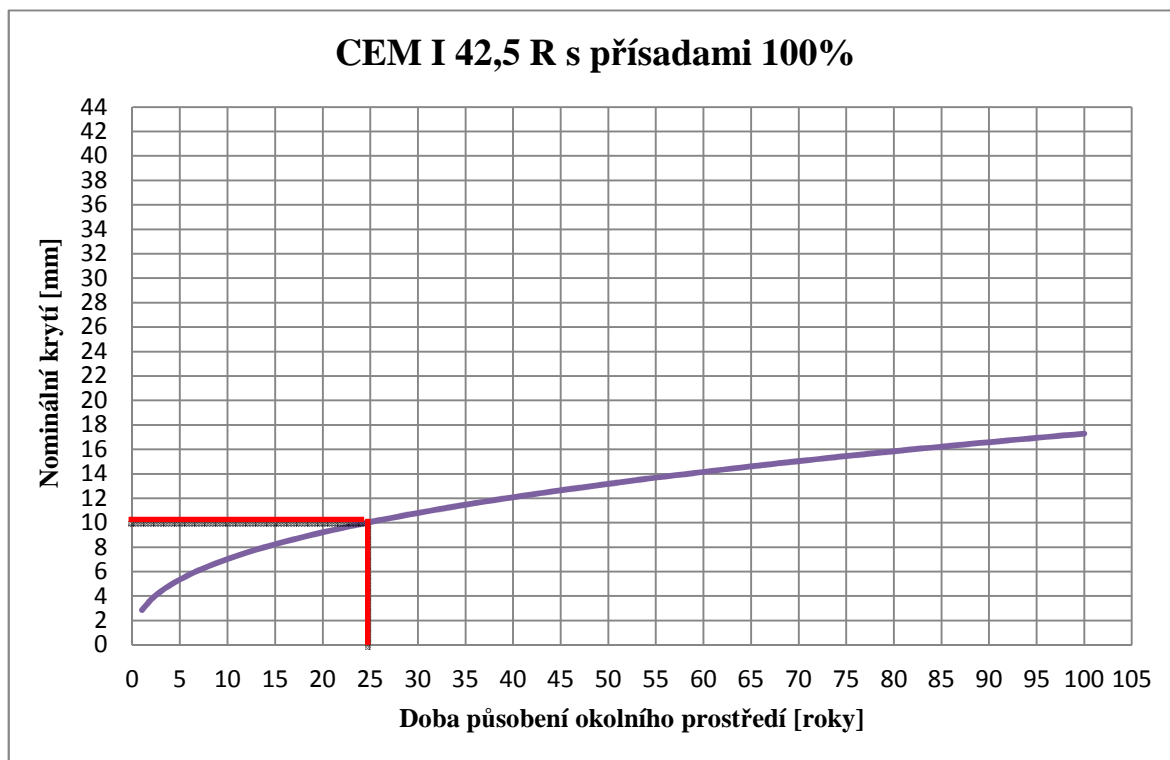


Obr. 10 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 2. receptury

Jak lze z grafu vyčíst, přidáním 50 % plastifikačních přísad je docíleno mírnějšího nárůstu výšky hloubky karbonatace než v předchozím případě. Z počátku je opět nárůst silnější, v prvních pěti letech dosáhne karbonatace do průměrné výšky 6 mm. Poté se nárůst lehce uklidňuje, ale neustává. Bezpečnostní rezerva krytí betonu by byla překročena ve 14. roce životnosti. Po 100 letech existence by výška karbonatace vzrostla na 21,5 mm, tato výsledná hodnota není zcela optimální pro bezpečné užívání stavby. Dle výsledků by při použití tohoto betonu v průběhu životnosti konstrukce musely proběhnout nákladné úpravy a údržby, které směřují k neefektivitě takovéto konstrukce.

3.3.3 Výsledek třetí receptury

Výsledky třetí receptury jsou uvedeny v příloze č. 1, v následujícím grafu je jejich grafické znázornění.

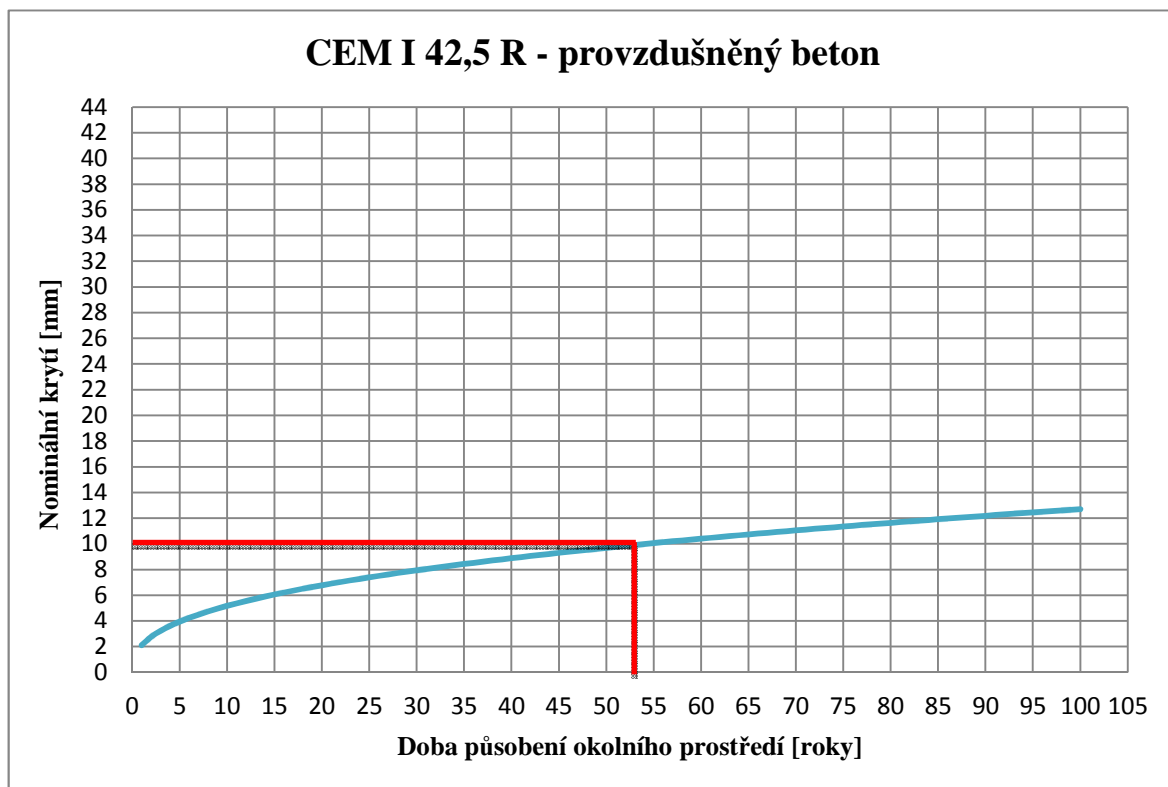


Obr. 11 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 3. receptury

Třetí graf patří ke znázornění růstu karbonatace třetí receptury betonu s namícháním 100 % přísad plastifikátoru. Vylepšení vlastností betonu je znát, opět v počátku hloubka vzroste během jednoho roku na 4 mm, ale poté se nárůst karbonatace zmírňuje. Tento beton lze dle výpočtů považovat za téměř dostatečný, v případě předpokladu, že karbonataci se nedá vyhnout. Nutno podotknout, že nákladné opravy budou v tomto případě také potřebné. Přibližně ve stáří konstrukce 25 let, kdy by byla překročena bezpečnostní rezerva krytí betonu, se opravy dají předpokládat téměř u každé konstrukce. V dosažení její 100leté životnosti by karbonatace mohla dosahovat hloubky 17 mm.

3.3.4 Výsledek čtvrté receptury

V příloze č. 1 jsou hodnoty výsledků z analýzy karbonatace jejichž grafické znázornění je zobrazeno v následujícím grafu.

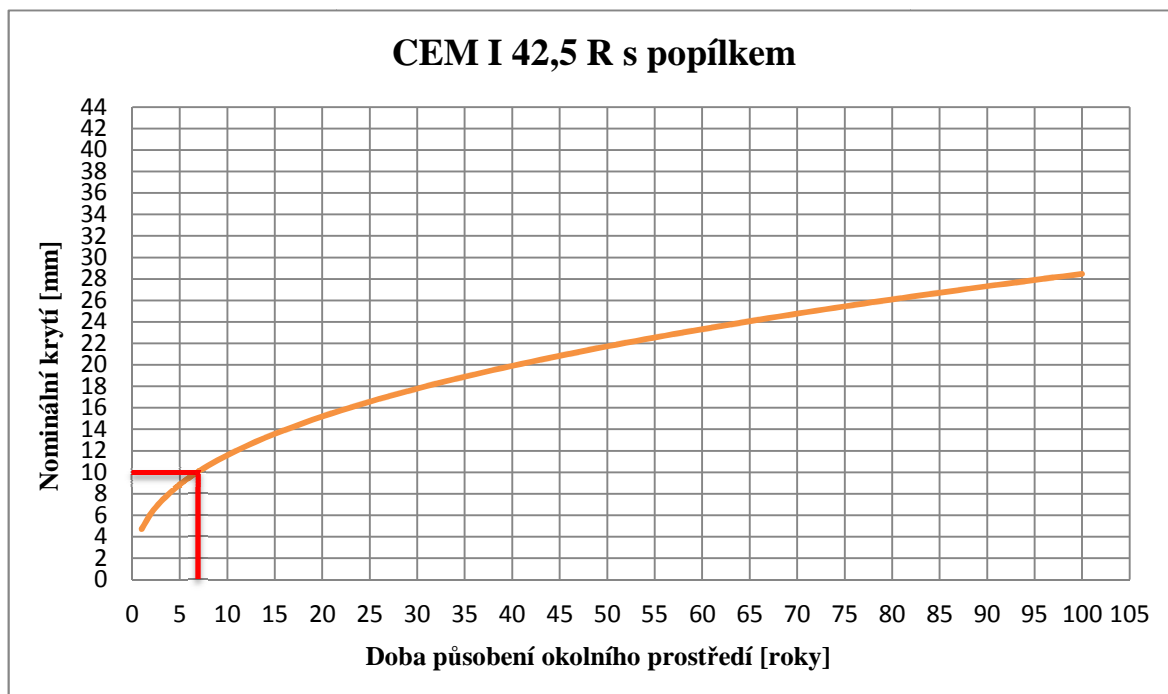


Obr. 12 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 4. receptury

Při pohledu na grafické znázornění výsledků nárůstu karbonatace je zřejmé, že díky plastifikačním přísadám se beton z hlediska kvality posunul na lepší pozici než předchozí receptury. Nárůst karbonatační hloubky v prvních pěti letech vzroste na 4 mm a postupně se nárůst zmenšuje. Překročení bezpečnosti rezervy nastane až v 55 letech života konstrukce. V této fázi s opravami lze počítat a stavba se proto nestává neefektivní z hlediska technického, ani ekonomického. Tuto navrženou recepturu nelze dle výsledků analýzy považovat za výbornou, vznik karbonatace se projevuje. I přesto lze recepturu hodnotit za téměř vhodnou.

3.3.5 Výsledek páté receptury

V následujícím grafu je zobrazeno grafické vyjádření výsledků analýzy karbonatace z přílohy č. 1.

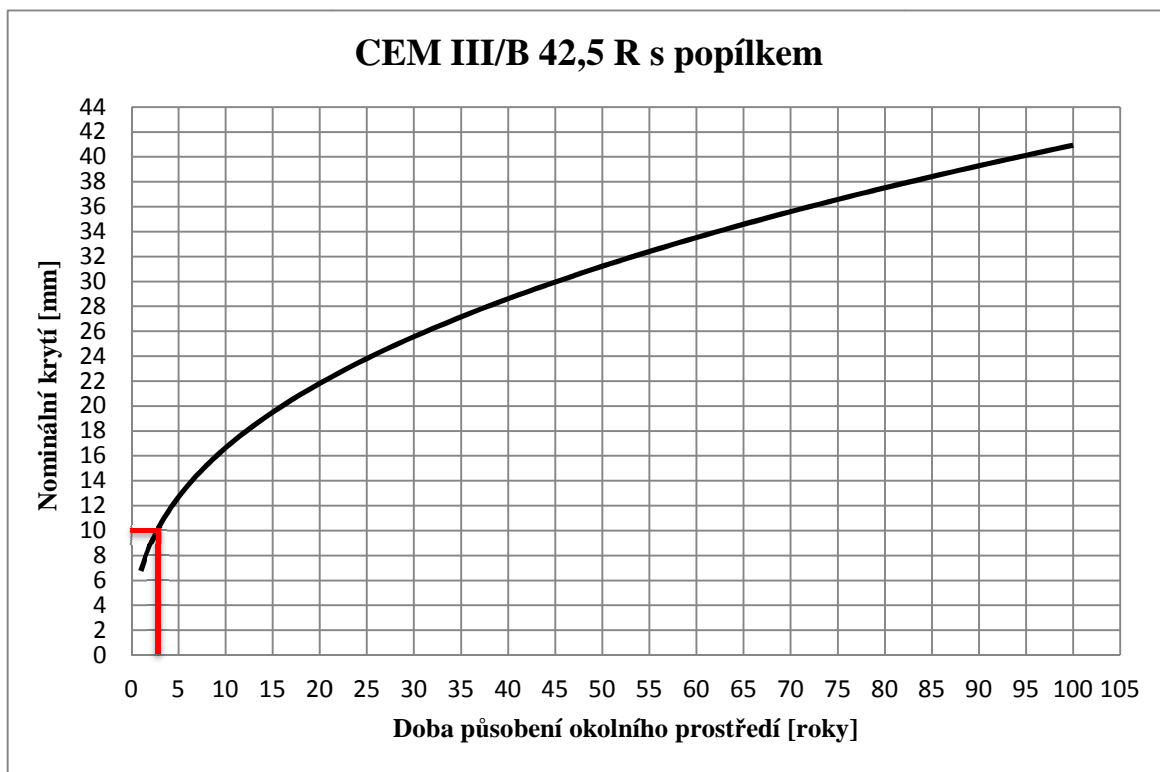


Obr. 13 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 5. receptury

Předcházející grafické znázornění představuje nárůst karbonatační hloubky páté receptury, do které je přidán obsah elektrárenského popílku. Výsledek z výpočetní analýzy je špatný, nárůst hloubky karbonatace už v prvních deseti letech vypovídá o tom, že tento beton není vhodný pro využití v daných podmínkách pro danou konstrukci. V počátku má nárůst vysoké tempo a s průběhem času neustává. Životnost by v tomto případě byla velice nízká, odlupování krycí vrstvy betonu z důvodu koroze výztuže by se začalo vyskytovat v rané fázi. Předpokládaná životnost 100 let by nebyla dodržena, protože hloubka karbonatace by v tuto chvíli byla ve výšce 28,5 mm, což není z hlediska bezpečného užívání možné. Tato receptura je dle výpočetní analýzy naprosto nevhodná.

3.3.6 Výsledek šesté receptury

Výsledky poslední měřené receptury jsou také uvedeny v příloze č. 1 a grafické znázornění je vyjádřeno v následujícím grafu.



Obr. 14 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 6. receptury

Z předchozího grafu je na první pohled vidět rapidní nárůst karbonatační hloubky. Od počátku až do konce životnosti je nárůst tak rychlý, že už v prvních deseti letech by karbonatace zapříčinila viditelné poruchy a posléze degradaci konstrukce. Tato receptura s vysokopecním cementem není dle výsledků pro danou lokalitu vůbec vhodná. Stavba by byla téměř od počátku realizace ekonomicky i technicky nevhodná a neefektivní. Je možné, že ani různé opravy a údržba by nestačily k udržení konstrukce v bezpečném a použitelném stavu, protože už v mladém věku např. deseti let karbonatace dosahuje hloubky téměř 17 mm. Při předpokládané životnosti 100 let by konstrukce musela vydržet karbonataci v hloubce 41 mm, což je nemožné a nepřípustné.

3.4 DISKUZE VÝSLEDKŮ ANALÝZY KARBONATACE BETONU

Ve výše uvedených kapitolách bylo rozebráno šest receptur betonu pro inženýrskou stavbu s lokalitou v Brně. Každá receptura má rozdílné složení. První receptura je beton bez přísad a příměsí, do druhé a do třetí je navržena plastifikační přísada, pouze v rozdílném množství. Ve čtvrté receptuře je také plastifikátor, ale ještě navíc přísada pro provzdušnění betonu. Pátá receptura je ve složení podobná jako receptura čtvrtá s rozdílem přidání obsahu elektrárenského popílku a poslední šestá receptura je z vysokopecního cementu.

Grafické znázornění všech receptur dohromady je ke zhlédnutí na Obr. 15 Výsledek analýzy na růst hloubky karbonatce betonu. Z obrázku je na první pohled jasné, že dle výpočtů je beton z vysokopecního cementu z hlediska karbonatce v navrženém prostředí naprosto nevhodný. Tuto reakci může vyvolat velké množství strusky, kterou cement obsahuje. Nárůst karbonatce je tak prudký, že v konečné fázi je její hloubka téměř o 3/4 vyšší než u betonu, který se jeví jako nejvhodnější. Stejně jako obsah strusky k odolnosti betonu proti karbonatci nepřispívá ani elektrárenský popílek, který je obsažen v páté receptuře. Tato směs také dle výsledků neodpovídá požadavkům, které by měl spolehlivý beton pro zvolenou konstrukci splňovat.

Jako nejvhodnější beton se dle matematického modelu jeví čtvrtá receptura (portlandský cement vylepšený o provzdušňovací a plastifikační přísady). Nárůst karbonatační hloubky je od počátku pozvolný a pokračuje tak až do předpokládaného konce životnosti konstrukce. Bezpečnostní rezervu krytí betonu přesahuje karbonatce ve stáří konstrukce přibližně 53 let, a poté už se jen lehce zvyšuje. Jeho konečná hodnota výšky karbonatce dosahuje pouze na 12,5 mm, tedy 2,5 mm nad bezpečnostní rezervu krytí betonu.

Receptury se stejným druhem cementu jsou vždy závislé na přísadách a příměsích pro vylepšení jejich kvality. V prvním případě je receptura bez jakýchkoliv přísad a příměsí a působí tedy jako třetí nejhorší z vybraných, s výškou karbonatce v konečné fázi životnosti konstrukce 25 mm. S přidáním přísad odolnost betonu proti karbonatci roste, důkazem jsou receptury následující, které obsahují jedna 50 % a druhá 100 % přísady. Z grafu lze vyčíst postupné snižování karbonatce u vylepšeného betonu s větším množstvím plastifikátoru o 4 mm v konečné předpokládané životnosti konstrukce.

Jak už bylo zmíněno, zkouška karbonatce se nejčastěji provádí až na poškozené konstrukci, kdy je u většiny případů zpětné dohledání přesného složení betonu téměř nemožné. Od odborníka doc. Ing. Michala Stehlíka, Ph.D. mi byly poskytnuty výsledky

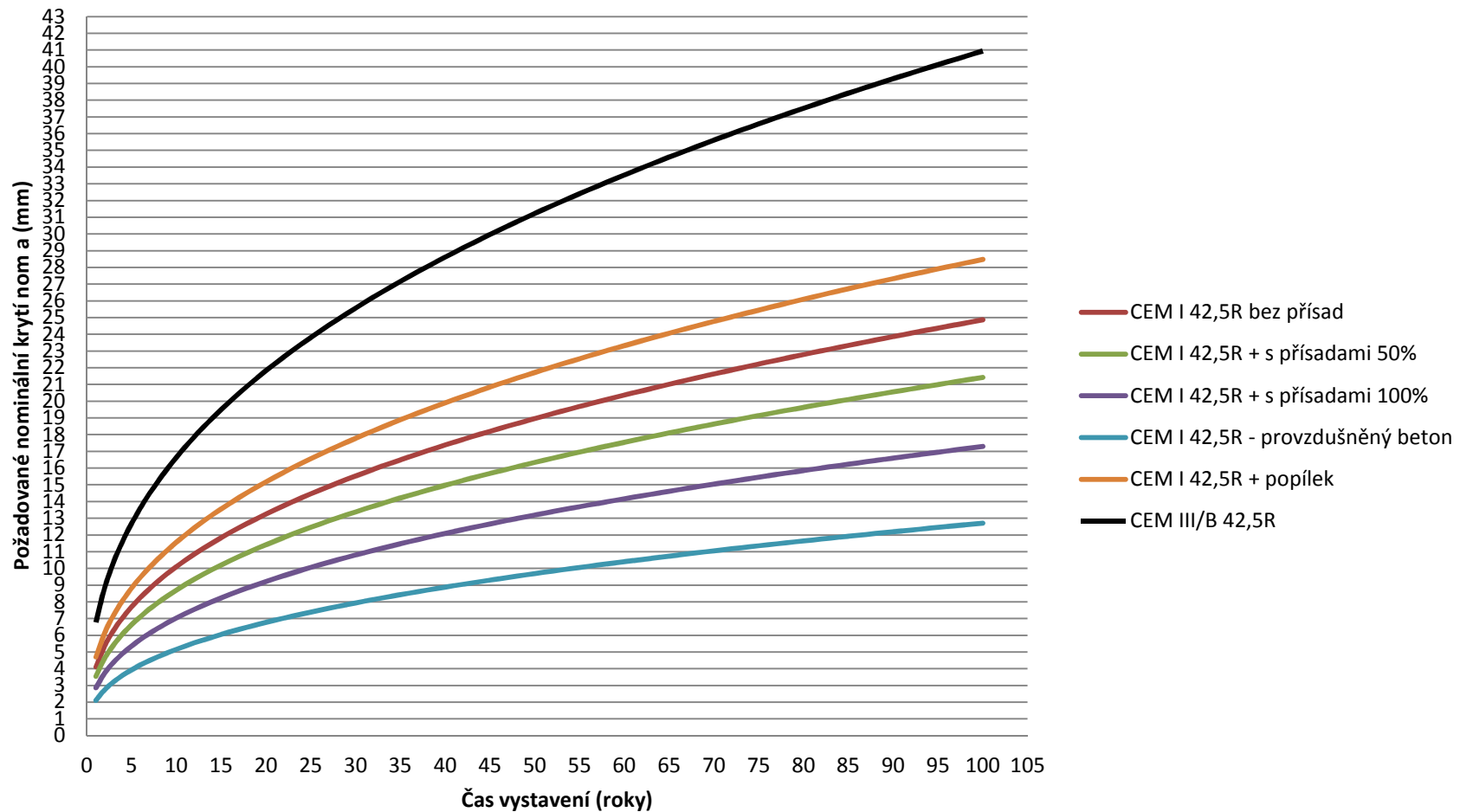
měření karbonatace z laboratoře, aby bylo možné naše výsledky porovnat a zjistit dokonalost výpočtu dle fib [16] a ISO 16204 [3].

Laboratorní práce probíhala na zkušebních tělesech o rozměrech 40x40x160 mm, druh cementu CEM I 42,5 R v množství 250 kg/m³ bez přísad. Proto je nejvhodnější porovnání s první recepturou této práce. Zkušební tělesa byla 120 dní uložena v 98% CO₂, doba odpovídá dvěma rokům uložení v běžné atmosféře. Výsledek tohoto měření je hloubka karbonatace 10 mm za dva roky. S porovnáním první receptury této práce, kdy výsledek teoretického výpočtu hloubky karbonatace ve dvou letech vychází na 5 mm, je laboratorní měření dvojnásobné.

V dalším laboratorím měření je zkoumán princip urychlené zkoušky na hloubku karbonatace s použitím obdobného složení betonu jako je zvoleno v této práci ve třetí receptuře. V tomto zkoušení bylo na prvcích provedeno měření hloubky karbonatace urychlenou zkouškou a také zkouškou při vystavení účinkům vnitřního prostředí i vnější povětrnosti. Pro porovnání využiji pouze výsledek při měření v běžné atmosféře. Výsledkem je hloubka karbonatace 5 mm za 200 dní, s postupným růstem až na 30 mm za 3 700 dní. V přepočtu hloubka karbonatace vychází na 10 mm za jeden rok. Dle výsledků z výpočetní analýzy hloubka karbonatace této receptury vychází na pouhé 3 mm za jeden rok. Tyto dva výsledky jsou od sebe hodně odlišné.

Při porovnání hodnot z výpočetní metody dle fib [16] společně s ISO 16204 [3] s naměřenými hodnotami z laboratorního měření jsou výsledky rozdílné. Rozdíly mohou být způsobeny malými rozdíly v recepturách betonu, které však nejsou tak velké, aby způsobily takovýto markantní rozdíl. Při řešení výpočtu dle analýzy jsou pro hodnoty týkajících se vlivů vnějšího prostředí brány hodnoty průměrné, které nejsou po celý rok stejné, jako například vlhkost, která se během roku mění a na beton tedy v různých obdobích působí rozdílně. Stejně jako pravděpodobnost deště je v letním období mnohem nižší než jindy, a proto není vhodné použít při výpočtu, kde má velký vliv na výsledek působení vnějšího prostředí, průměrné hodnoty. Také nepřesnost výsledků může být způsobeno měřením v laboratoři s atmosférou s 0,03 % CO₂, která pouze přibližně odpovídá skutečné atmosféře. Rozdíl ve zjištěných hodnotách může být způsoben mnoha důvody, které nelze během těchto měření určit, ale s největší pravděpodobností to bude nedokonalost jak výpočetního řešení, tak měření v laboratoři. Oba způsoby jsou pouze odhadující, nikoli přesné.

Návrhová hodnota karbonatační výšky



Obr. 15 Graf výsledků analýzy na růst hloubky karbonatace betonu

3.5 URČENÍ MRAZUVZDORNOSTI METODOU DÍLČÍCH SOUČINITELŮ

Všechny konstrukce, které jsou vystaveny okolnímu prostředí zařazeného dle Tab. 5 Stupně vlivu prostředí do třídy XF, jsou vystaveny mrazu a rozmrazování za přítomnosti vody. Každé zimní období je z hlediska mrazuvzdornosti pro betonové konstrukce nepříjemností. Obsahuje-li beton přebytečné množství vody, je jisté, že v zimním období v betonu začne vznikat napětí od mrznoucí vody a zpětného rozmrazení. Následkem těchto účinků může být degradace betonu.

Tato kapitola bude věnována výpočetní analýze na mrazuvzdornost betonu metodou dílčích součinitelů podle ISO 16204 [3] a podle fib [16]. Stejně jako v minulém případě je uvažována životnost konstrukce 100 let, dle Tab. 1 Informativní návrhová životnosti se jedná o stavbu inženýrského typu. Výpočet mrazuvzdornosti betonu proběhne na čtyřech odlišných recepturách betonů, poté bude možné zvolit jednu z receptur za nejvhodnější a zároveň nejvíce přijatelnou z hlediska mrazuvzdornosti.

Návrhová hodnota kritického stupně nasycení $S_{cr,d}$ je zvolena pro každý druh betonu stejná a je zvolena dle fib [16], kde tato hodnota odpovídá 0,88. Pro výpočet návrhové hodnoty skutečného stupně nasycení $S_{ACT,d}(t < t_{SL})$ je použit také model dle fib [16], výpočet se provádí dle vzorce (16). Dílčími parametry tohoto modelu je hodnota bodu zlomu nasycení S_n , koeficient e absorpce vody závislý na vodivosti vzduchu, životnost konstrukce závislá na době vlhkosti v letech t_{eq} a koeficient závislý na velikosti pórů vzduchu d .

Hodnota bodu zlomu nasycení S_n je určena jako průměrná hodnota odvozená z křivek získaných ze zkoušky vztlínivosti z projektu GAČR 13-18870S Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu.

Tab. 16 Bod zlomu nasycení S_n

	S_n
1. receptura – CEM I 42,5 R bez přísad	0,772
2. receptura – CEM I 42,5 R s přísadami 50 %	0,748
3. receptura – CEM I 42,5 R s přísadami 100 %	0,745
4. receptura – CEM I 42,5 R – provzdušněný beton	0,741

Koeficient e závislý na vodivosti vzduchu, je volen ze zkoušky TPT, která byla provedena v rámci projektu GAČR 13-18870S Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu.

Tab. 17 Koeficient závislý na vodivosti vzduchu pro každou recepturu e

	e
1. receptura – CEM I 42,5 R bez přísad	0,051
2. receptura – CEM I 42,5 R s přísadami 50 %	0,050
3. receptura – CEM I 42,5 R s přísadami 100 %	0,036
4. receptura – CEM I 42,5 R – provzdušněný beton	0,049

Hodnota koeficientu absorpce vody závislá na velikosti pórů vzduchu d je také volena na základě výsledků projektu GAČR 13-18870S Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu. Koeficienty jsou převzaty ze zkoušky spacing factoru dle Americké technické normy ASTM C 457.

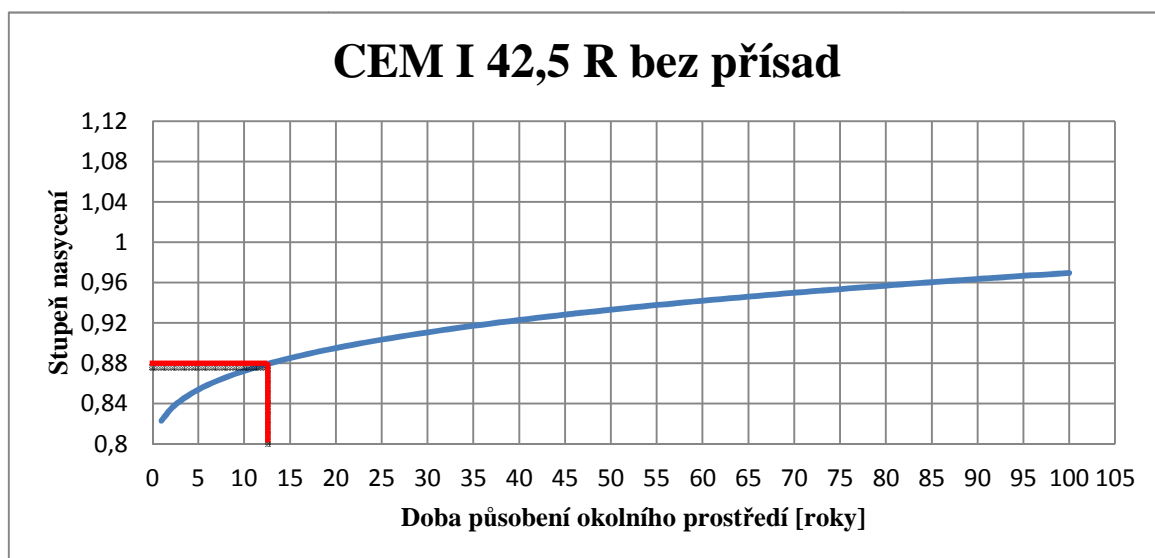
Tab. 18 Koeficient absorpce vody závislý na velikosti pórů vzduchu d

	d
1. receptura – CEM I 42,5 R bez přísad	0,294
2. receptura – CEM I 42,5 R s přísadami 50 %	0,235
3. receptura – CEM I 42,5 R s přísadami 100 %	0,505
4. receptura – CEM I 42,5 R – provzdušněný beton	0,215

Výsledky výpočetní analýzy na mrazuvzdornost betonu jsou přiloženy v části Příloha č. 2 – Výpočetní analýza – mrazuvzdornost betonu.

3.6 VÝSLEDKY VÝPOČTU MRAZUVZDORNOSTI BETONU

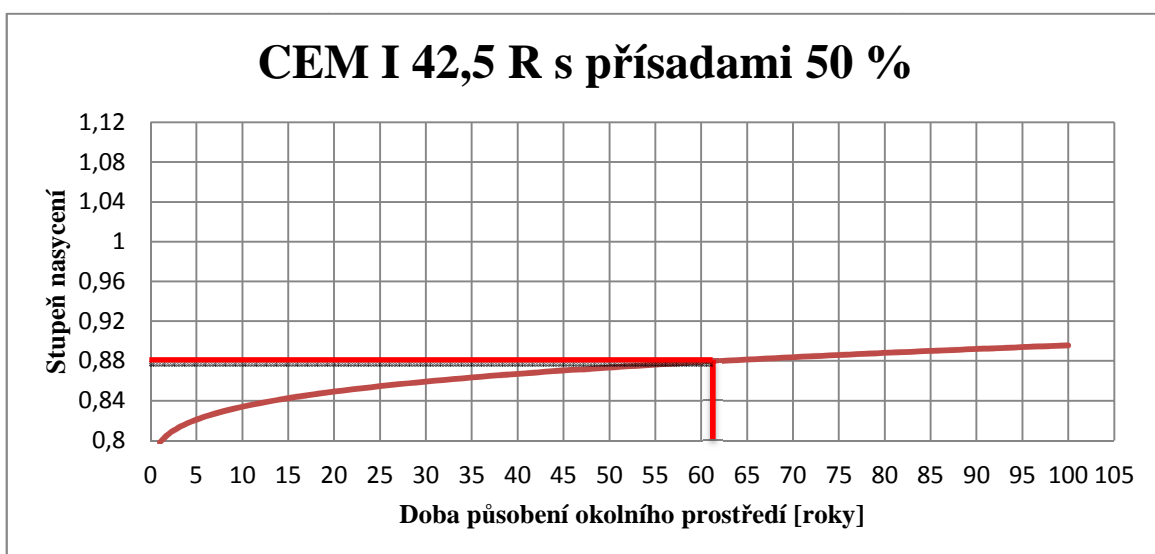
3.6.1 Výsledek první receptury



Obr. 16 Graf výsledků mrazuvzdornosti 1. receptury

Už při prvním pohledu je zřejmé, že první receptura není dle výsledků analýzy vhodná pro konstrukce vystavené okolnímu prostředí třídy XF. Maximální kritická hodnota stupně nasycení 0,88 by byla již po dvanácti letech životnosti konstrukce překročena. Výsledkem analýzy je, že tento beton není mrazuvzdorný.

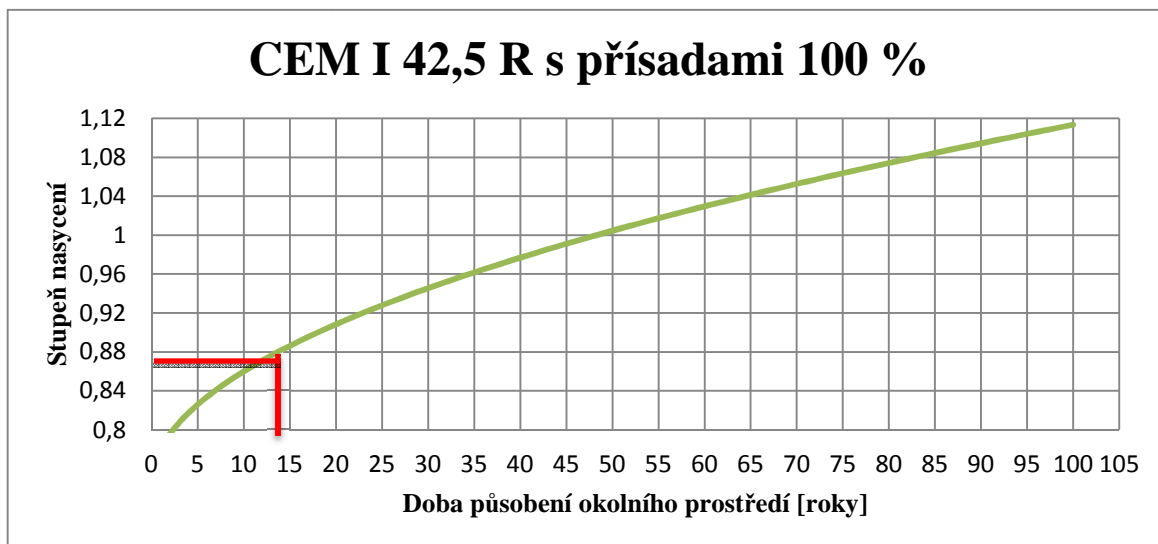
3.6.2 Výsledek druhé receptury



Obr. 17 Graf výsledků mrazuvzdornosti 2. receptury

Z předchozího grafu lze vyhodnotit, že beton se složením druhé receptury je dle výpočetní analýzy značně lepší z hlediska mrazuvzdornosti než beton předchozí. Kritická hodnota stupně nasycení by byla dle výsledků překročena v 62. roce životnosti.

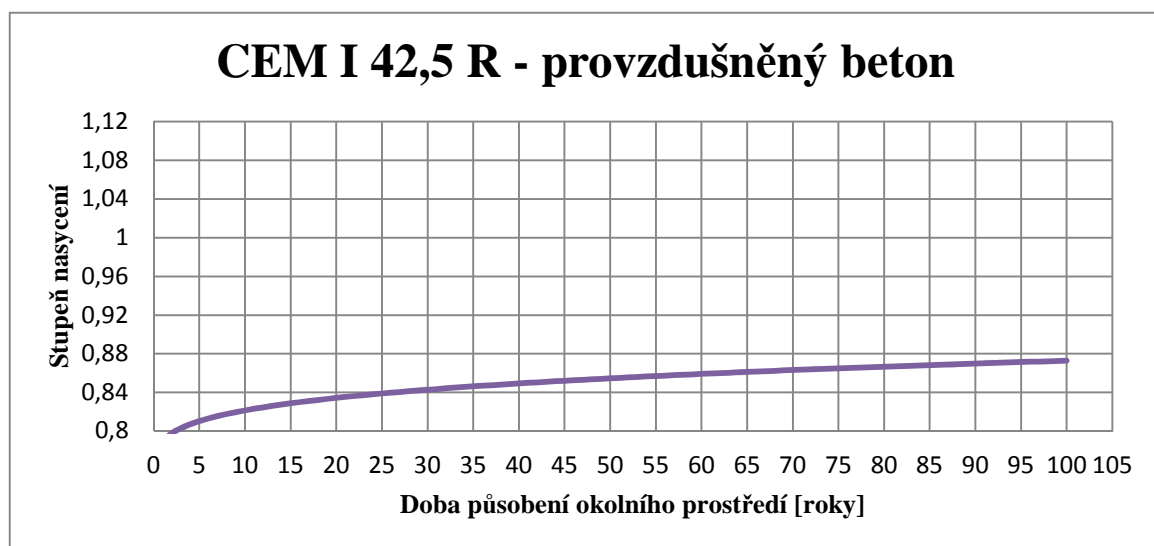
3.6.3 Výsledek třetí receptury



Obr. 18 Graf výsledků mrazuvzdornosti 3. receptury

Výsledek grafu vypočtené mrazuvzdornosti třetí receptury, kdy je přidáno 100 % přísad, je horší než předchozí výsledek, který patřil receptuře pouze s 50 % přísad. Odolnosti mrazuvzdornosti tohoto betonu by byla překročena ve 14. roce životnosti konstrukce.

3.6.4 Výsledek čtvrté receptury



Obr. 19 Graf výsledků mrazuvzdornosti 4. receptury

Čtvrtá receptura je z takových přísad, že je beton možné nazvat provzdušněný beton. Tento beton má ze čtyř zkušebních betonů nejlepší výsledek. Překročení hodnoty kritického stupně nasycení nenastane v celém průběhu životnosti konstrukce. Dle výsledků z výpočetní analýzy je tento beton zvolen jako vhodným betonem pro stavbu vystavenou prostředí se střídavými teplotami.

3.7 DISKUZE VÝSLEDKŮ ANALÝZY MRAZUVZDORNOSTI BETONU

Mrazuvzdornost betonu byla měřena na čtyřech druhích betonu s různými recepturami, které jsou rozepsané výše. Grafické znázornění všech výsledků dohromady je na Obr. 20 Výsledky analýzy na mrazuvzdornost betonu. Z tohoto obrázku lze vyčíst, která receptura je a která není vhodná pro použití v prostředí, kde je očekáván výskyt působení střídavých teplot, tedy prostředí XF.

Jako nejméně vhodný beton pro výstavbu konstrukce v prostředí XF je beton z portlandského cementu s přidáním 100 % plastifikační přísady, který je dle výpočtů absolutně nemrazuvzdorný, tudíž nevhodný. Ve 14. roce životnosti beton z hlediska mrazuvzdornosti selhává a křivka mrazuvzdornosti nadále rapidně roste.

Dalším nevhodným betonem pro prostředí se střídavými teplotami je beton z portlandského cementu bez přísad a příměsí. Po srovnání výsledků s betonem z portlandského cementu s přidáním 100 % přísady by se dalo říci, že beton bez přísad je dle výpočtů z hlediska mrazuvzdornosti horší, z důvodů překročení kritického bodu nasycení o dva roky dříve. Ovšem jeho následný průběh není tak rychlý, je spíše pozvolný a dosahuje přijatelnějších konečných hodnot. Výpočetní model prokazuje, že beton bez přísad není vhodný pro daný účel stavby.

Receptura z portlandského cementu s přidáním 50 % plastifikační přísady je z hlediska mrazuvzdornosti vhodnější než předchozí varianty, dle matematického výpočtu se projevil jako téměř vhodným betonem. Hodnota stupně nasycení na konci životnosti betonové konstrukce stoupá až na 0,895.

Nejvíce vhodnou recepturou ze čtyř vybraných se dle výpočetní analýzy projevila receptura s provzdušňovacími přísadami. Kritický stupeň nasycení není překročen po celou dobu životnosti konstrukce. Hodnota stupně nasycení na konci životnosti konstrukce dosahuje 0,875.

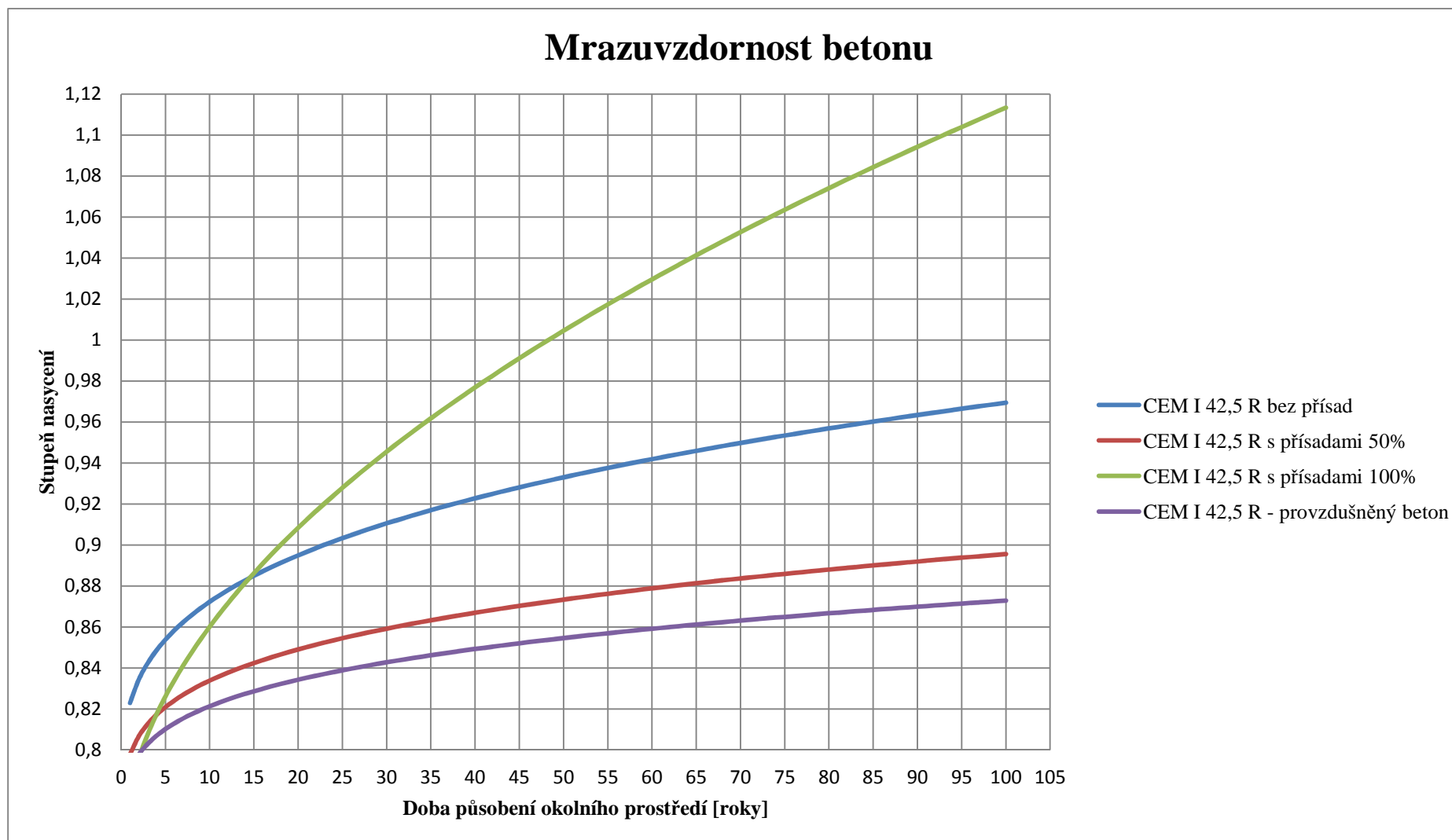
V předchozích kapitolách byly popsány různé metody pro měření mrazuvzdornosti. Metoda RDM měřená ultrazvukem a rezonancí a metoda součinitele mrazuvzdornosti měřená poklesem pevnosti v tahu ohybem. Tyto metody se provádějí v laboratořích SZK FAST VUT v Brně, jejichž výsledky měřené v projektu GAČR 13-18870S - Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu budou porovnány s výpočetními výsledky z analýzy mrazuvzdornosti betonu dle ISO 16204 [3].

Projekt GAČR 13-18870S uvádí hodnoty, které z analýzy nelze přímo vyjádřit, ale z výsledků je možné odvodit, zdali je nebo není beton mrazuvzdorný. Jejich výsledky hovoří o tom, že pokud je součinitel mrazuvzdornosti vyšší než 75 %, je beton mrazuvzdorný. Z Tab. 19 lze vyčíst, že beton s přidáním 100 % přísady není mrazuvzdorný, stejně jako beton z portlandského cementu bez přidání přísad a příměsí. Mrazuvzdorným betonem po padesáti i stech cyklech dle výsledků projektu GAČR 13-18870S je provzdušněný beton i beton z portlandského cementu s přidáním 50 % přísady.

Při srovnání výsledků z výpočetní analýzy dle ISO 16204 [3] a výsledků projektu GAČR 13-18870S - Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu, je výsledek téměř podobný. Vhodnost receptur pro využití betonu v prostředí se střídavými teplotami je totožná, rozdíl se liší v tom, že laboratorní měření je jednorázové, zatímco výpočetní analýza zkoumá průběh nasycení během celé životnosti konstrukce.

Tab. 19 Výsledky mrazuvzdornosti projektu GAČR 13-18870S [33]

	po 50 cyklech [%]				po 100 cyklech [%]			
	RDM (U)	RDM (FL)	RDM (FF)	Součinitel mrazuvz.	RDM (U)	RDM (FL)	RDM (FF)	Součinitel mrazuvz.
1. receptura CEM I 42,5 R bez přísad	84	88	87	78	55	56	55	61
2. receptura CEM I 42,5 R s přísadami 50 %	96	97	96	102	94	95	93	112
3. receptura CEM I 42,5 R s přísadami 100 %	80	81	79	71	60	63	61	45
4. receptura CEM I 42,5 R – provzdušněný beton	101	9	99	98	101	100	100	98



Obr. 20 Graf výsledků analýzy na mrazuvzdornost betonu

4 ZÁVĚR

Tato diplomová práce pojednává o složité problematice týkající se životnosti konstrukcí. Životnost úzce souvisí s trvanlivostí a spolehlivostí konstrukcí, jejichž nejlepších výsledků bude dosaženo správným, kvalitním a nezanedbaným přístupem od prvotní myšlenky zhotovení konstrukce. Při návrhu je nutno dbát na možné hrozby, které mohou konstrukci v průběhu výstavby a následné životnosti dostihnout a ohrozit její funkci, dále na bezpečné užívání a hospodárnost stavby.

V zárodku myšlenky je nutné si uvědomit, co od konstrukce očekáváme a jaká bude její hlavní funkce. Od těchto faktorů se odvíjí návrh, přičemž tato fáze je důležitá pro vhodný výběr stavebních komponentů. Dále je důležité zvážit vnější okolnosti jako například účinky zatížení, kterým bude muset stavba odolávat, okolní prostředí, kterému bude stavba vystavena apod. Do této části návrhu konstrukce patří i analýzy, kterým byla tato diplomová práce věnovaná a to je karbonatace a mrazuvzdornost betonu. Obě analýzy jsou směřovány na průběh životnosti při vzniku těchto hrozeb. Pro analýzu karbonatace betonu bylo vybráno šest druhů betonu a pro analýzu mrazuvzdornosti betonu byly vybrány čtyři druhy betonu.

Karbonatace byla analyzována pomocí výpočtu průběhu růstu karbonatační hloubky, to vše pro prostředí XC4 v okolí města Brna. Zkoumáno bylo šest rozdílných receptur betonu. Každý z těchto druhů betonu má odlišné vlastnosti, proto nárůst hloubky karbonatace je jiný, každý z betonů je jinak odolný a přizpůsobivý danému okolí. Výsledky ukázaly, že beton z vysokopecního cementu obsahující výztuž nebo kovové vložky je podle výsledků analýzy nejméně vhodným betonem pro vlhké prostředí. Jako nejvhodnější se podle výpočetního modelu jeví beton s portlandským cementem vylepšený o provzdušňovací a plastifikační přísady. Po porovnání výsledků matematického modelu s výsledky z laboratorního měření není zřejmé, zda tato výpočetní analýza splnila svoji funkci správně. Je možné, že není vhodné uvažovat pouze průměrné hodnoty na celý průběh životnosti, protože se s časem mění nejen okolní prostředí stavby, ale zároveň i vlastnosti konstrukce.

Mrazuvzdornost betonu byla zkoumána na čtyřech recepturách betonu, které byly totožné s recepturami z předchozího výpočtu. Výpočetní model mrazuvzdornosti je závislý na stupni nasycení betonu. Výsledky výpočetní analýzy prokázaly, že provzdušněný beton je nejvíce odolný proti mrazu a rozmrazování a beton z portlandského cementu s přidáním 100 % přísad není vhodný do vlhkého prostředí. Po porovnání výsledků z výpočtů lze usoudit, že výsledky jsou téměř srovnatelné s výsledky z projektu GAČR 13-18870S - Hodnocení

a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu, jehož výsledky pochází z měření v laboratořích. Na základě provedených výpočetních analýz a reálných zkoušek betonu jsem usoudila, že výpočetní analýza se projevila jako vhodný model pro určení životnosti železobetonové konstrukce z hlediska mrazuvzdornosti a jako předběžný výpočet průběhu mrazuvzdornosti ve fázi, kdy se konstrukce navrhuje.

Použití těchto rizikových analýz v praxi bych doporučila jako orientační metody. Metody přiblíží hodnoty výsledků, prozradí vhodnost druhu betonu pro určitý typ prostředí, ale nezaručí shodný průběh s reálným chováním konstrukce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BERÁNKOVÁ, Eva. *Portál TZB-info: Životní cyklus staveb* [online]. Praha, 12.8.2013 [cit. 2016-01-03]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/udrzba-budov/10219-zivotni-cyklus-staveb>
- [2] TP 175: *Stanovení životnosti betonových konstrukcí objektů pozemních komunikací, Změna 1 – Příloha C*. In: . Praha: Ministerstvo dopravy - obor pozemních komunikací, 2006, s. 45.
- [3] ISO 16204: *Durability - service life design of concrete structures*. Švýcarsko: ISO Copyright office, 2012, 31 s.
- [4] ŠMERDA, Zdeněk a kol. *Životnost betonových staveb*. 1. vyd. Praha: Český svaz stavebních inženýrů, 1999, 182 s. Technická knihnice autorizovaného inženýra a technika. ISBN 80-902-6978-8.
- [5] KUPILÍK, Václav. *Závady a životnost staveb*. 1. vyd. Praha: Grada, 1999, 282 s. ISBN 80-716-9581-5.
- [6] ČSN EN 1992-1-1: *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 202 s.
- [7] VALENTA, Oldřich. *Trvanlivost betonu a betonových konstrukcí*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 296 s. Řada stavební literatury.
- [8] ČSN EN 1990: *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 112 s.
- [9] *Spolehlivost a bezpečnost stavebních nosných konstrukcí: [přednáška]*. Ostrava: Vysoká škola Báňská, 2010.
- [10] ISO 2394: *General principles on reliability for structures*. Švýcarsko: ISO copyright office, 2003, 77 s.
- [11] ROTTER, Tomáš. *Portál TZB-info: Provádění ocelových konstrukcí* [online]. Praha, 5.11.2012 [cit. 2016-01-03]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/drevene-a-ocelove-konstrukce/9241-provadeni-ocelovych-konstrukci>
- [12] ČSN EN 206: *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 88 s.
- [13] MENCL, Václav. *Diagnostika staveb a zkušebnictví: [přednáška]*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta architektury, 2012.

- [14] *Portál Repairs From Professionals: Karbonatace a sanace železobetonu* [online]. 2011 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.reprof.eu/karbonatace-a-sanace-zelezobetonu-a126>
- [15] ŽÍDEK, Libor. *Technická měření a diagnostika staveb: Diagnostika betonových a železobetonových konstrukcí*. Projekt FRVŠ č. 2529, 2009.
- [16] *FIB Bulletin 34: Model Code for Service Life Design*. 1. Švýcarsko: International Federation for Structural Concrete, 2006, 110 s. ISBN 2-88394-074-6. ISSN 1562-3610.
- [17] MATOUŠEK, Milan a Rostislav DROCHYTKA. *Atmosférická koroze betonů*. Vyd. 1. Praha: IKAS, 1998, 171 s. ISBN 80-902-5580-9.
- [18] ŠNIRCH, Zdeněk, Amos DUFKA a Martin LUKAVEC. *METODIKA STANOVENÍ VLIVU VERTIKÁLNÍCH TRHLIN NA PLÁŠT CHLADÍCÍ VĚŽE. Beton TKS: Sanace a rekonstrukce*. (3/2010): 64-67, 84 s.
- [19] DOHNÁLEK, Jiří, Rudolf HELA, Petr TŮMA, Jiří KOLÍSKO a Jan HROMÁDKO. *Zkoušení mrazuvzdornosti betonu. Beton TKS: Sanace*. (3/2008): 54-60, 84 s.
- [20] KOMÁRKOVÁ, Tereza, KOCÁB, Dalibor; MORAVCOVÁ, Bronislava. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu pomocí nedestruktivních metod*. In *Sborník XX. mezinárodní konference CONSTRUMAT 2014 - Construction materials*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. s. 29-35. ISBN: 978-80-248-3381.
- [21] ČSN 73 1322: *Stanovení mrazuvzdornosti betonu (změna Z1 - 2003)*. Praha: Český normalizační institut, 1968, 8 s.
- [22] ČSN 73 1380: *Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury*. Český normalizační institut, 2007, 32 s.
- [23] ČSN 73 1326: *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (změna Z1 - 2003)*. Praha: Český normalizační institut, 1985, 12 s.
- [24] Český hydrometeorologický ústav. *Resort životního prostředí: Historická data - meteorologie a klimatologie* [online]. Brno [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/>

- [25] MISÁK, Petr (ed.). *Trvanlivost 2015: sborník příspěvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta stavební - Ústav stavebního zkušebnictví, 2015, 170 s. ISBN 978-80-214-5245-9.
- [26] POSPÍŠIL, Ondřej. *Diagnostika stavebních konstrukcí při hodnocení aktuálního stavu*. Brno, 2012, 57 s. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
- [27] ČSN EN 14630: *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení hloubky zasažení karbonatací v zatvrdlém betonu pomocí fenolftaleinové metody*. Praha: Českým normalizačním institutem, 2008, 12 s.
- [28] ČSN ISO 31000: *Management rizik - Principy a směrnice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 40 s.
- [29] ČSN EN 31010: *Management rizik - Techniky posuzování rizik*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 80 s.
- [30] FAGERLUND, G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *RILEM*. , 13 s.
- [31] LACASSE, M.A. a D.J. VANIER. *Durability of Building Materials and Components 8*. Ottawa: K1A 0R6 Canada, 1999.
- [32] TANG, Luping. Validation of models and test methods for assessment of durability of concrete structures in the road environment. *CBI Betonginstitutet*. Švédsko: Vägverket, 2010, 60.
- [33] *Informační systém výzkumu, experimentálního vývoje a inovací: GA13-18870S - Hodnocení a predikce trvanlivosti povrchové vrstvy betonu* [online]. Brno, 2015 [cit.2016-04-17].Dostupné z: <https://www.isvav.cz/projectDetail.do;jsessionid=C111CBF5353F56E94446DCDABF6FF9DC?rowId=GA13-18870>
- [34] CHROMÁ, M. *Studium a modelování karbonatce betonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 143 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [35] CIKRLE, Petr a Ondřej POSPÍCHAL. Nový způsob mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch. *Beton TSK: Sanace a rekonstrukce*. (3/2011): 56-61, 92 s.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vývojový diagram pro životnost konstrukce [3]	12
Obr. 2 Možné příčinné vztahy vzniku vad a poruch [4]	14
Obr. 3 Vyjádření variability účinků a odporu konstrukce [9]	20
Obr. 4 Bezpečnostní rezerva[9]	21
Obr. 5 Fenolftaleinový test karbonatace [26]	27
Obr. 6 Míra karbonatace betonu v okolí trhlin [18]	34
Obr. 7 Zjišťování pevnosti v tahu ohybem, hranol ve zkušebním lisu [20]	36
Obr. 8 Průměrná relativní vlhkost vzduchu [24]	43
Obr. 9 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 1. receptury	46
Obr. 10 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 2. receptury	47
Obr. 11 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 3. receptury	48
Obr. 12 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 4. receptury	49
Obr. 13 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 5. receptury	50
Obr. 14 Graf výsledků růstu hloubky karbonatace 6. receptury	51
Obr. 15 Graf výsledků analýzy na růst hloubky karbonatace betonu	54
Obr. 16 Graf výsledků mrazuvzdornosti 1. receptury	57
Obr. 17 Graf výsledků mrazuvzdornosti 2. receptury	57
Obr. 18 Graf výsledků mrazuvzdornosti 3. receptury	58
Obr. 19 Graf výsledků mrazuvzdornosti 4. receptury	58
Obr. 20 Graf výsledků analýzy na mrazuvzdornost betonu	61

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Informativní návrhové životnosti [6].....	18
Tab. 2 Definice tříd následků [8]	22
Tab. 3 Doporučení minimální hodnoty indexu spolehlivosti β (mezní stav únosnosti) [9].....	23
Tab. 4 Úroveň hodnocení stavu [3].....	23
Tab. 5 Stupně vlivu prostředí [12]	24
Tab. 6 Hodnota parametru provedení pro různé doby ošetření [16].....	31
Tab. 7 Lineární hodnoty $RACC, 0, k - 1$ [3].....	32
Tab. 8 První receptura čerstvého betonu.....	41
Tab. 9 Druhá receptura čerstvého betonu	41
Tab. 10 Třetí receptura čerstvého betonu.....	41
Tab. 11 Čtvrtá receptura čerstvého betonu	42
Tab. 12 Pátá receptura čerstvého betonu	42
Tab. 13 Šestá receptura čerstvého betonu	42
Tab. 14 Lineární hodnota efektivní odolnosti proti karbonataci pro každou recepturu	44
Tab. 15 Hodnoty parametrů pro analýzu karbonatace betonu	45
Tab. 16 Bod zlomu nasycení S_n	55
Tab. 17 Koeficient závislý na vodivosti vzduchu pro každou recepturu e	56
Tab. 18 Koeficient absorpce vody závislý na velikosti pórů vzduchu d	56
Tab. 19 Výsledky mrazuvzdornosti projektu GAČR 13-18870S [33].....	60

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Výpočetní analýza – karbonatace betonu	1
Příloha č. 2 – Výpočetní analýza – mrazuvzdornost betonu.....	8

Příloha č. 1 – Výpočetní analýza – karbonatace betonu

Použité vzorce

Použité vzorce jsou popsány v kapitole 2.1.2

$$x_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2 k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot (k_{t,d} \cdot R_{ACC,0,k}^{-1} \cdot \gamma_R + \epsilon_{t,d}) \cdot C_{S,d} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})}$$

$$k_{e,d} = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real,k}}{\gamma_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e}$$

$$k_{c,d} = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c}$$

$$W(t_{SL}) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}}$$

$$ToW = \frac{\text{dešťové dny } h_{Nd} \geq 2,5 \text{ mm srážek v roce}}{365}$$

CEM I 42,5 R bez přísad

X = t _{SL} [roky]	Y
1	4,113747
2	5,393483
3	6,319452
4	7,071328
5	7,715604
6	8,285355
7	8,799773
8	9,271130
9	9,707809
10	10,11583
11	10,49969
12	10,86282
13	11,20796
14	11,53727
15	11,85255
16	12,15526
17	12,44666
18	12,72779
19	12,99955
20	13,26274
21	13,51803
22	13,76601
23	14,00722
24	14,24211
25	14,47112
26	14,69462
27	14,91293
28	15,12637
29	15,33522
30	15,53973
31	15,74012
32	15,93661
33	16,12940
34	16,31866

35	16,50455
36	16,68724
37	16,86687
38	17,04355
39	17,21743
40	17,38861
41	17,55721
42	17,72332
43	17,88703
44	18,04844
45	18,20763
46	18,36469
47	18,51967
48	18,67266
49	18,82372
50	18,97291
51	19,12029
52	19,26593
53	19,40987
54	19,55216
55	19,69286
56	19,83200
57	19,96964
58	20,10582
59	20,24057
60	20,37394
61	20,50597
62	20,63668
63	20,76611
64	20,89429
65	21,02127
66	21,14705
67	21,27168

68	21,39519
69	21,51759
70	21,63892
71	21,75919
72	21,87844
73	21,99668
74	22,11394
75	22,23023
76	22,34559
77	22,46003
78	22,57356
79	22,68621
80	22,79800
81	22,90893
82	23,01904
83	23,12833
84	23,23682
85	23,34453
86	23,45146
87	23,55765
88	23,66309
89	23,76780
90	23,87180
91	23,97510
92	24,07771
93	24,17964
94	24,28091
95	24,38152
96	24,48149
97	24,58083
98	24,67954
99	24,77764
100	24,87514

CEM I 42,5 R s přísadami 50 %

X = t _{SL} [roky]	Y
1	3,542742
2	4,644845
3	5,442286
4	6,089799
5	6,644646
6	7,135313
7	7,578329
8	7,984259
9	8,360325
10	8,711713
11	9,042288
12	9,355020
13	9,652249
14	9,935852
15	10,20737
16	10,46806
17	10,71901
18	10,96112
19	11,19516
20	11,42182
21	11,64167
22	11,85523
23	12,06296
24	12,26525
25	12,46247
26	12,65494
27	12,84296
28	13,02677
29	13,20663
30	13,38275
31	13,55533
32	13,72455
33	13,89057
34	14,05356

35	14,21365
36	14,37099
37	14,52568
38	14,67784
39	14,82758
40	14,97500
41	15,12020
42	15,26325
43	15,40424
44	15,54324
45	15,68034
46	15,81559
47	15,94906
48	16,08082
49	16,21091
50	16,33939
51	16,46632
52	16,59174
53	16,71570
54	16,83824
55	16,95941
56	17,07924
57	17,19777
58	17,31505
59	17,43110
60	17,54596
61	17,65965
62	17,77222
63	17,88369
64	17,99408
65	18,10343
66	18,21176
67	18,31909

68	18,42545
69	18,53086
70	18,63535
71	18,73892
72	18,84162
73	18,94345
74	19,04443
75	19,14459
76	19,24393
77	19,34248
78	19,44026
79	19,53727
80	19,63354
81	19,72908
82	19,82390
83	19,91802
84	20,01145
85	20,10421
86	20,19630
87	20,28775
88	20,37855
89	20,46873
90	20,55830
91	20,64726
92	20,73563
93	20,82341
94	20,91062
95	20,99727
96	21,08336
97	21,16891
98	21,25392
99	21,33840
100	21,42237

CEM I 42,5 R s přísadami 100 %

X = t _{SL} [roky]	Y
1	2,859918
2	3,749602
3	4,393345
4	4,916057
5	5,363964
6	5,760060
7	6,117689
8	6,445381
9	6,748964
10	7,032626
11	7,299486
12	7,551943
13	7,791884
14	8,020826
15	8,240008
16	8,450458
17	8,653039
18	8,848483
19	9,037418
20	9,220388
21	9,397865
22	9,570265
23	9,737954
24	9,901258
25	10,06047
26	10,21584
27	10,36762
28	10,51600
29	10,66120
30	10,80337
31	10,94269
32	11,07929
33	11,21332
34	11,34489

35	11,47413
36	11,60114
37	11,72601
38	11,84885
39	11,96973
40	12,08874
41	12,20594
42	12,32142
43	12,43524
44	12,54746
45	12,65813
46	12,76731
47	12,87506
48	12,98142
49	13,08643
50	13,19015
51	13,29262
52	13,39386
53	13,49393
54	13,59285
55	13,69067
56	13,78740
57	13,88309
58	13,97776
59	14,07145
60	14,16417
61	14,25595
62	14,34682
63	14,43680
64	14,52592
65	14,61419
66	14,70164
67	14,78828

68	14,87415
69	14,95924
70	15,04359
71	15,12720
72	15,21010
73	15,29231
74	15,37383
75	15,45468
76	15,53487
77	15,61443
78	15,69336
79	15,77168
80	15,84939
81	15,92651
82	16,00306
83	16,07904
84	16,15447
85	16,22934
86	16,30369
87	16,37751
88	16,45081
89	16,52361
90	16,59591
91	16,66773
92	16,73906
93	16,80993
94	16,88033
95	16,95027
96	17,01977
97	17,08883
98	17,15746
99	17,22566
100	17,29344

CEM I 42,5 R – provzdušněný beton

X = t _{SL} [roky]	Y
1	2,101057
2	2,754670
3	3,227600
4	3,611614
5	3,940671
6	4,231666
7	4,494401
8	4,735142
9	4,958171
10	5,166565
11	5,362616
12	5,548085
13	5,724359
14	5,892553
15	6,053576
16	6,208185
17	6,357012
18	6,500597
19	6,639399
20	6,773819
21	6,904204
22	7,030859
23	7,154053
24	7,274025
25	7,390989
26	7,505136
27	7,616638
28	7,725652
29	7,832320
30	7,936769
31	8,039117
32	8,139474
33	8,237937
34	8,334600

35	8,429545
36	8,522851
37	8,614591
38	8,704833
39	8,793640
40	8,881070
41	8,967178
42	9,052016
43	9,135632
44	9,218071
45	9,299377
46	9,379589
47	9,458746
48	9,536883
49	9,614035
50	9,690233
51	9,765508
52	9,839890
53	9,913405
54	9,986080
55	10,05794
56	10,12901
57	10,19931
58	10,26886
59	10,33768
60	10,40580
61	10,47323
62	10,53999
63	10,60609
64	10,67156
65	10,73641
66	10,80066
67	10,86431

68	10,92739
69	10,9899
70	11,05187
71	11,11330
72	11,17420
73	11,23459
74	11,29448
75	11,35388
76	11,41280
77	11,47125
78	11,52923
79	11,58677
80	11,64386
81	11,70052
82	11,75675
83	11,81257
84	11,86798
85	11,92300
86	11,97761
87	12,03184
88	12,08570
89	12,13918
90	12,19230
91	12,24506
92	12,29746
93	12,34952
94	12,40124
95	12,45263
96	12,50369
97	12,55442
98	12,60484
99	12,65495
100	12,70474

CEM I 42,5 R s popílkem

X = t _{SL} [roky]	Y
1	4,708417
2	6,173147
3	7,232971
4	8,093535
5	8,830946
6	9,483058
7	10,07184
8	10,61133
9	11,11114
10	11,57814
11	12,01749
12	12,43312
13	12,82815
14	13,20506
15	13,56591
16	13,91239
17	14,24590
18	14,56767
19	14,87873
20	15,17996
21	15,47215
22	15,75598
23	16,03205
24	16,30091
25	16,56302
26	16,81882
27	17,06870
28	17,31299
29	17,55203
30	17,78610
31	18,01546
32	18,24036
33	18,46101
34	18,67763

35	18,89040
36	19,09950
37	19,30508
38	19,50731
39	19,70633
40	19,90225
41	20,09522
42	20,28534
43	20,47272
44	20,65747
45	20,83967
46	21,01942
47	21,19681
48	21,37192
49	21,54481
50	21,71557
51	21,88426
52	22,05095
53	22,21569
54	22,37855
55	22,53959
56	22,69885
57	22,85639
58	23,01225
59	23,16648
60	23,31913
61	23,47024
62	23,61985
63	23,76799
64	23,9147
65	24,06003
66	24,20400
67	24,34665

68	24,48801
69	24,62810
70	24,76696
71	24,90463
72	25,04111
73	25,17644
74	25,31065
75	25,44376
76	25,57579
77	25,70677
78	25,83672
79	25,96565
80	26,09360
81	26,22057
82	26,34659
83	26,47168
84	26,59586
85	26,71913
86	26,84153
87	26,96306
88	27,08375
89	27,20360
90	27,32263
91	27,44086
92	27,55830
93	27,67497
94	27,79088
95	27,90603
96	28,02045
97	28,13415
98	28,24713
99	28,35942
100	28,47101

CEM III/B 42,5 R s popílkem

X = t _{SL} [roky]	Y
1	6,771284
2	8,877745
3	10,4019
4	11,6395
5	12,69999
6	13,63781
7	14,48455
8	15,2604
9	15,97918
10	16,6508
11	17,28263
12	17,88036
13	18,44845
14	18,99051
15	19,50945
16	20,00773
17	20,48737
18	20,95011
19	21,39744
20	21,83065
21	22,25085
22	22,65904
23	23,05607
24	23,44271
25	23,81966
26	24,18754
27	24,54689
28	24,89822
29	25,24198
30	25,5786
31	25,90845
32	26,23188
33	26,54921
34	26,86073

35	27,16672
36	27,46743
37	27,76309
38	28,05392
39	28,34013
40	28,62189
41	28,8994
42	29,17282
43	29,4423
44	29,70798
45	29,97001
46	30,22852
47	30,48363
48	30,73545
49	30,98409
50	31,22966
51	31,47226
52	31,71198
53	31,9489
54	32,18312
55	32,41471
56	32,64374
57	32,8703
58	33,09445
59	33,31626
60	33,53579
61	33,7531
62	33,96825
63	34,18129
64	34,39229
65	34,60129
66	34,80834
67	35,01348

68	35,21677
69	35,41824
70	35,61795
71	35,81592
72	36,0122
73	36,20683
74	36,39984
75	36,59127
76	36,78114
77	36,96951
78	37,15638
79	37,34181
80	37,52581
81	37,70841
82	37,88965
83	38,06954
84	38,24812
85	38,4254
86	38,60143
87	38,7762
88	38,94976
89	39,12212
90	39,29331
91	39,46334
92	39,63224
93	39,80002
94	39,9667
95	40,13231
96	40,29686
97	40,46037
98	40,62286
99	40,78434
100	40,94482

Příloha č. 2 – Výpočetní analýza – mrazuvzdornost betonu

Použité vzorce

Použité vzorce jsou popsány v kapitole 2.2.2

$$S_{ACT}(t < t_{SL}) = S_n + e \cdot t_{eq}^d$$

CEM I 42,5 R bez přísad

X = t _{SL} [roky]	γ
1	0,823000
2	0,834528
3	0,842444
4	0,848661
5	0,853859
6	0,858367
7	0,862371
8	0,865989
9	0,869301
10	0,872362
11	0,875214
12	0,877889
13	0,880410
14	0,882798
15	0,885068
16	0,887234
17	0,889307
18	0,891294
19	0,893206
20	0,895048
21	0,896825
22	0,898544
23	0,900209
24	0,901823
25	0,903391
26	0,904914
27	0,906397
28	0,907842
29	0,909251
30	0,910626
31	0,911969
32	0,913281
33	0,914565
34	0,915822

35	0,917053
36	0,918259
37	0,919442
38	0,920603
39	0,921742
40	0,922861
41	0,923960
42	0,925040
43	0,926103
44	0,927148
45	0,928176
46	0,929189
47	0,930186
48	0,931168
49	0,932136
50	0,933090
51	0,934030
52	0,934958
53	0,935873
54	0,936776
55	0,937667
56	0,938547
57	0,939416
58	0,940274
59	0,941122
60	0,941960
61	0,942788
62	0,943606
63	0,944415
64	0,945216
65	0,946007
66	0,946790
67	0,947564

68	0,948331
69	0,949089
70	0,949840
71	0,950583
72	0,951319
73	0,952048
74	0,952769
75	0,953484
76	0,954192
77	0,954894
78	0,955589
79	0,956278
80	0,956960
81	0,957637
82	0,958308
83	0,958973
84	0,959633
85	0,960287
86	0,960935
87	0,961578
88	0,962216
89	0,962849
90	0,963477
91	0,964100
92	0,964719
93	0,965332
94	0,965941
95	0,966545
96	0,967145
97	0,967741
98	0,968332
99	0,968919
100	0,969501

CEM I 42,5 R s přísadami 50 %

X = t _{SL} [roky]	Y
1	0,798000
2	0,806845
3	0,812728
4	0,817255
5	0,820984
6	0,824179
7	0,826989
8	0,829507
9	0,831795
10	0,833895
11	0,835841
12	0,837656
13	0,839358
14	0,840963
15	0,842483
16	0,843926
17	0,845303
18	0,846619
19	0,847880
20	0,849091
21	0,850257
22	0,851381
23	0,852466
24	0,853516
25	0,854533
26	0,855520
27	0,856478
28	0,857409
29	0,858315
30	0,859197
31	0,860057
32	0,860896
33	0,861716
34	0,862516

35	0,863299
36	0,864065
37	0,864815
38	0,865549
39	0,866269
40	0,866975
41	0,867667
42	0,868347
43	0,869014
44	0,869669
45	0,870314
46	0,870947
47	0,871570
48	0,872183
49	0,872786
50	0,873380
51	0,873965
52	0,874541
53	0,875109
54	0,875668
55	0,876220
56	0,876764
57	0,877301
58	0,877830
59	0,878353
60	0,878869
61	0,879378
62	0,879881
63	0,880378
64	0,880869
65	0,881354
66	0,881833
67	0,882307

68	0,882775
69	0,883238
70	0,883696
71	0,884149
72	0,884598
73	0,885041
74	0,885480
75	0,885914
76	0,886344
77	0,886770
78	0,887191
79	0,887609
80	0,888022
81	0,888431
82	0,888837
83	0,889239
84	0,889637
85	0,890031
86	0,890422
87	0,890809
88	0,891194
89	0,891574
90	0,891952
91	0,892326
92	0,892697
93	0,893065
94	0,893430
95	0,893792
96	0,894152
97	0,894508
98	0,894862
99	0,895212
100	0,895560

CEM I 42,5 R s přísadami 100 %

X = t _{SL} [roky]	Y
1	0,781000
2	0,796088
3	0,807697
4	0,817501
5	0,826149
6	0,833975
7	0,841178
8	0,847888
9	0,854193
10	0,860160
11	0,865839
12	0,871267
13	0,876475
14	0,881489
15	0,886328
16	0,891010
17	0,895549
18	0,899958
19	0,904248
20	0,908427
21	0,912503
22	0,916485
23	0,920378
24	0,924188
25	0,927920
26	0,931580
27	0,935170
28	0,938695
29	0,942158
30	0,945562
31	0,948911
32	0,952206
33	0,955452
34	0,958648

35	0,961799
36	0,964905
37	0,967969
38	0,970992
39	0,973976
40	0,976922
41	0,979833
42	0,982708
43	0,985549
44	0,988358
45	0,991136
46	0,993883
47	0,996601
48	0,999290
49	1,001952
50	1,004587
51	1,007196
52	1,009779
53	1,012339
54	1,014874
55	1,017387
56	1,019876
57	1,022344
58	1,024791
59	1,027217
60	1,029622
61	1,032008
62	1,034375
63	1,036722
64	1,039051
65	1,041363
66	1,043657
67	1,045933

68	1,048193
69	1,050437
70	1,052664
71	1,054876
72	1,057072
73	1,059254
74	1,061420
75	1,063573
76	1,065711
77	1,067835
78	1,069945
79	1,072042
80	1,074127
81	1,076198
82	1,078256
83	1,080303
84	1,082337
85	1,084359
86	1,086369
87	1,088368
88	1,090355
89	1,092332
90	1,094297
91	1,096252
92	1,098196
93	1,100129
94	1,102052
95	1,103966
96	1,105869
97	1,107762
98	1,109646
99	1,111521
100	1,113385

CEM I 42,5 R – provzdušněný beton

X = t _{SL} [roky]	Y				
1	0,790000	35	0,846238	68	0,862391
2	0,797874	36	0,846877	69	0,862772
3	0,803055	37	0,847502	70	0,863150
4	0,807014	38	0,848115	71	0,863523
5	0,810259	39	0,848715	72	0,863892
6	0,813028	40	0,849303	73	0,864257
7	0,815455	41	0,849879	74	0,864618
8	0,817623	42	0,850445	75	0,864975
9	0,819588	43	0,851000	76	0,865329
10	0,821389	44	0,851545	77	0,865679
11	0,823053	45	0,852080	78	0,866025
12	0,824603	46	0,852606	79	0,866368
13	0,826054	47	0,853124	80	0,866707
14	0,827420	48	0,853632	81	0,867043
15	0,828711	49	0,854133	82	0,867376
16	0,829937	50	0,854625	83	0,867706
17	0,831104	51	0,855110	84	0,868033
18	0,832218	52	0,855587	85	0,868357
19	0,833284	53	0,856058	86	0,868677
20	0,834308	54	0,856521	87	0,868995
21	0,835292	55	0,856978	88	0,869310
22	0,836239	56	0,857428	89	0,869622
23	0,837154	57	0,857872	90	0,869931
24	0,838038	58	0,858309	91	0,870238
25	0,838893	59	0,858741	92	0,870542
26	0,839722	60	0,859168	93	0,870843
27	0,840527	61	0,859588	94	0,871142
28	0,841308	62	0,860004	95	0,871439
29	0,842068	63	0,860414	96	0,871733
30	0,842807	64	0,860819	97	0,872024
31	0,843527	65	0,861219	98	0,872314
32	0,844229	66	0,861614	99	0,872601
33	0,844915	67	0,862005	100	0,872885
34	0,845584				